ENCYCLOPÉDIE DES SCIENCES INDUSTRIELLES QUILLET

Nouvelle encyclopédie pratique de mécanique, d'électricité et d'électronique

Mécanique
Applications - Transports

BIEN MOUDRE ET POUR TOUS

LIBRAIRIE ARISTIDE QUILLET
11 boulevard de Sébastopol, Paris 1er

LE RAIL

CHAPITRE PREMIER

LA VOIE FERRÉE ET LES PHÉNOMÈNES D'INTERACTION VÉHICULE-VOIE

1. GÉNÉRALITÉS

Il convient de rappeler que les deux caractères fondamentaux du chemin de fer sont les suivants :

a) roulement de roues en acier sur un chemin de roulement également en acier et de faible largeur : le rail,

b) guidage précis des véhicules par le rail également.

— Le contact métal sur métal permet des charges importantes par essieu et, la surface de contact étant petite, la résistance au roulement est faible (environ 3 daN par tonne de charge d'essieu). La puissance nécessaire par tonne remorquée est donc nettement plus faible que sur route. Toutefois, aux vitesses très grandes, la résistance de l'air devenant prépondérante, cet avantage est évidemment fortement réduit.

— Le guidage présente de très grands avantages : sécurité d'abord, par réduction au minimum des lames d'air entre véhicules circulant sur des voies voisines et entre véhicules et ouvrages d'art (d'où limitation des emprises au strict minimum pour un gabarit de véhicule déterminé) ; possibilité de constituer des « trains » longs conduits par un seul agent (économie de main-d'œuvre) n'ayant à observer que les signaux sans se soucier des autres convois qui précèdent ou croisent. Le guidage facilite considérablement l'organisation du trafic ; la cybernétique trouve dans le chemin de fer un domaine d'application particulièrement favorable, qui est mis à profit au maximum.

Outre son rôle de chemin de roulement et de guide, le rail remplit aussi un rôle de support en étalant les charges sur les traverses. Celles-ci répartissent à leur tour ces charges sur le ballast, et ce dernier sur la plate-forme. L'ensemble doit être étudié de manière telle que des pressions exercées sur la plate-forme restent dans des limites admissibles de façon que, non seulement il n'y ait pas poinçonnement, mais, bien plus, que les tassements résiduels inévitables évoluent suffisamment lentement sous l'action répétée des charges ; c'est un des rôles du ballast (cette même préoccupation se retrouve dans l'étude de la constitution des routes mais elle reçoit des solutions différentes).

Ces tassements ne seraient pas gênants s'ils étaient uniformes, c'est-à-dire les mêmes en tous points. Il n'en est jamais ainsi en raison, d'une part, de l'hétérogénéité de la plate-forme, d'autre part, et surtout, de l'inégalité des efforts qui s'exercent sur les rails (ou sur la route) par suite des oscillations des véhicules. Il se produit donc des tassements différents qui finalement altèrent la régularité de la surface de roulement. Des ondulations apparaissent et vont en s'aggravant avec le trafic. Au bout d'un certain temps, il devient nécessaire d'y apporter des corrections. Alors que sur la route, cela se fait en régularisant la surface de la chaussée elle-même par rechargement, au moyen d'un tapis bitumeux continu par exemple, sur la voie ferrée, cela se fait par-dessous en relevant la voie, mettant à profit pour cela la possibilité de remanier facilement le ballast. C'est un autre rôle fondamental du ballast, et il y a là une différence essentielle avec la route. La nécessité de pouvoir corriger le nivellement de la voie par-dessous, à peu de frais, explique que la voie ballastée n'ait pas cédé la place à la voie posée sur dalle en béton. Sur plate-forme meuble, une telle voie correctement conçue subirait certainement des tassements différentiels moins importants que la voie ballastée, mais son coût d'établissement serait nettement plus élevé (deux à trois fois plus) ; les corrections, bien que moins nombreuses, seraient également nettement plus onéreuses. Le bilan économique, dans les conditions actuelles de trafic, n'est pas en faveur d'une telle solution.

La voie ferrée n'a donc pas varié dans son principe, mais chacun de ses éléments a fait l'objet de progrès très importants. Les progrès réalisés dans les moyens mis en œuvre pour construire, entretenir et renouveler la voie ferrée ont été également considérables. Comme dans beaucoup d'autres techniques, ces progrès ont été plus importants pendant les vingt à vingt-cinq dernières années que pendant tout un siècle auparavant.

2. LA VOIE FERRÉE SUR SUPPORT ÉLASTIQUE

À la différence des véhicules routiers pour lesquels le contact des roues sur la chaussée se fait par un pneumatique, c'est-à-dire un élément très élastique, les véhicules ferroviaires comportent des masses non suspendues relativement grandes, voisines de 1 200 kg pour un essieu de wagon, 3 500 kg pour un essieu moteur de locomotive. Les rails n'étant pas parfaitement rectilignes, ni les roues parfaitement rondes et équilibrées, il est évident qu'à grande vitesse les oscillations verticales de ces masses non suspendues provoqueraient des surcharges dynamiques inadmissibles si la voie ne présentait pas une élasticité verticale suffisante. Cette élasticité résulte de la flexibilité des traverses et de la compressibilité du ballast, de la plate-forme lorsqu'elle n'est pas rocheuse, des semelles en caoutchouc que comportent les voies modernes entre rail et traverses. Cette élasticité dépend en outre de l'inertie verticale du rail et de l'espacement des traverses. De plus, le ballast, par le frottement de ses éléments les uns contre les autres, procure un amortissement très important.



Fig. I-1

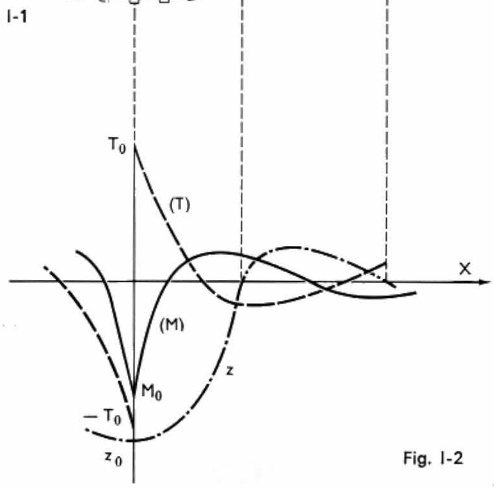


Fig. I-2

On définit l'élasticité verticale de la voie par le rapport de son enfoncement z au droit d'une roue, à la charge Q de cette roue (fig. I-1). Elle est généralement comprise entre $\frac{1}{10}$ et $\frac{1}{4}$ mm/t.

On sait depuis longtemps faire le calcul statique de la voie reposant sur un support élastique uniforme.

On caractérise généralement l'élasticité du support des rails, c'est-à-dire de l'ensemble constitué par le ballast, la plate-forme, les traverses, les semelles en caoutchouc, par ce que l'on appelle le *module de voie*. Si l'on suppose chacun des rails chargé uniformément à raison de r tonnes par mètre, l'enfoncement élastique uniforme correspondant en chaque point de la voie est z (mètres) : le module de voie est le rapport $k = \frac{r}{z}$ (tonnes par mètre carré).

Cette notion n'est applicable en toute rigueur que dans le cas d'un appui continu. Lorsque les traverses sont assez rapprochées, la théorie de l'appui continu est en pratique suffisante. Il existe cependant une théorie tenant compte de la discontinuité des appuis, que l'on n'exposera pas ici car on ne demande pas à la théorie de fournir des valeurs numériques mais seulement de mettre en évidence l'influence relative des divers paramètres.

Sous l'action d'un essieu supportant une charge $2Q$, les rails présentent une courbe d'enfoncement élastique dont l'équation est de part et d'autre de la charge Q :

$$z = \frac{Q}{\sqrt{2}}\,\frac{\alpha}{k}\,\mathbf{e}^{-\alpha x}\cos\left(\alpha x - \frac{\pi}{4}\right) \quad (x > 0)$$

avec $\alpha = \sqrt[4]{\dfrac{k}{4\,EI}}$

E : module de Young de l'acier = 20000 hbar

I : moment d'inertie verticale d'un rail.

C'est une sinusoïde amortie de longueur d'onde $\lambda = \frac{2\pi}{\alpha}$ (fig. I-2).

Le moment de flexion du rail a pour expression :

$$M = \frac{Q}{2\sqrt{2}\,\alpha}\,\mathbf{e}^{-\alpha x}\cos\left(\alpha x + \frac{\pi}{4}\right) \qquad (x > 0)$$

et présente un point anguleux au droit de la charge, tandis que l'effort tranchant :

$$T = \pm\,\frac{Q}{2}\,\mathbf{e}^{-\alpha x}\cos\alpha x \qquad (x > 0)$$

présente évidemment une discontinuité d'amplitude Q.

On notera :

— Que le moment maximal au droit de la charge $M = \frac{Q}{4\alpha}$ est le même que pour une poutre sur appui simple de longueur $L = \frac{1}{\alpha} = \sqrt[4]{\frac{4\,EI}{k}}$.

— Que la voie se soulève légèrement devant et derrière la roue : c'est ce que l'on appelle l'*onde de précession*. Dans le cas d'un boggie à deux essieux, dont l'espacement est toujours supérieur à 1,50 m, on peut voir que la deuxième roue a pour effet d'augmenter l'enfoncement mais de réduire le moment de flexion.

Les valeurs du moment et de l'enfoncement au droit d'une roue isolée sont :

$$M = \frac{Q}{2\sqrt{2}}\sqrt[4]{\frac{EI}{k}}$$

$$z = \frac{Q}{2\sqrt{2}}\sqrt[4]{\frac{1}{EI\,k^3}}$$

tandis que la contrainte de flexion est :

$$\sigma = \frac{Q}{2\sqrt{2}}\,v\sqrt[4]{\frac{E}{I^3\,k}}$$

v étant la distance de la fibre supérieure ou inférieure à l'axe d'inertie verticale de la section du rail.

Pour des profils de rails homothétiques, on voit d'après ces formules que z diminue en fonction de la section S du profil comme $\frac{1}{\sqrt{S}}$, tandis que σ diminue comme $\frac{1}{S}$. En fonction de l'élasticité $\varphi = \frac{1}{k}$ du support, z augmente comme $\varphi^{3/4}$, tandis que σ n'augmente que comme $\varphi^{1/4}$.

Les contraintes de flexion sont peu sensibles à l'élasticité du support, beaucoup plus au poids du rail, tandis que l'élasticité de la voie $\frac{z}{Q}$ et par suite on l'a vu, les surcharges dynamiques dues aux oscillations des masses non suspendues, sont beaucoup plus sensibles à l'élasticité du support qu'au poids du rail. Si à faible vitesse on peut se contenter de rails légers sur un support dur (voies de tramway, voies de port par exemple), à grande vitesse un rail lourd sur support souple est avantageux.

Dans le cas d'appuis discrets espacés de l, si l'on appelle ρ le coefficient de réaction de la traverse, c'est-à-dire le rapport de la charge par tête de traverse à l'enfoncement, on a en première approximation :

$$\rho = k\,l$$

La réaction R de la traverse située au droit d'une roue a pour expression :

$$R = \frac{Q}{2\sqrt{2}}\sqrt[4]{\frac{l^3\,\rho}{EI}}$$

On voit que la diminution de ρ et l'augmentation de I entraînent une diminution de R et, par suite, des pressions sous la traverse, élément favorable à la tenue du nivellement de la voie.

La réalité est cependant plus complexe : la partie supérieure du champignon du rail subit des déformations plastiques, qui d'ailleurs finissent par se stabiliser, et le métal s'écrouit. Il en résulte des modifications des contraintes résiduelles du rail, qui ne sont pas les mêmes tout le long du rail, d'où des déformations longitudinales du rail, c'est-à-dire des ondulations. Il est évident que, la zone déformée plastiquement étant indépendante de la section du rail, toutes choses égales par ailleurs, l'amplitude de ces ondulations sera d'autant moins importante que l'inertie du rail sera plus grande. Les surcharges dynamiques seront de ce fait également plus faibles. Cette remarque renforce encore l'intérêt d'un rail lourd.

Ce sont les surcharges dynamiques qu'il faut essentiellement s'efforcer de réduire. Les contraintes de flexion sont d'ailleurs toujours relativement faibles et jamais un rail n'est mis hors d'usage du fait de ces contraintes. Ce sont les défauts de fatigue dans le champignon ou les défauts de surface sous l'effet des contraintes hertziennes directement fonction des charges dynamiques de roues qui le rendent inutilisable.

Les contraintes de flexion, en fait, jouent un rôle secondaire. Ainsi, sous un essieu de locomotive dont la charge nominale est de 21 t, les charges dynamiques de roues peuvent atteindre 17.10^3 daN (170 kN) à 200 km/h (pour 10,5 t de charge nominale). Avec un rail de 50 kg par mètre, les contraintes de flexion d'une voie correctement nivelée ne dépassent pas 16 hbar, valeur très inférieure à la limite de fatigue en flexion de l'acier à rail. On n'a jamais réussi à rompre un rail par des essais de flexion répétés sous pulsateur avec des contraintes de 20 hbar. L'expérience confirme pourtant qu'une voie en rails de 60 kg par mètre se comporte beaucoup mieux qu'une voie en rails de 50 kg par mètre.

Le choix du profil du rail est un problème économique, dans lequel beaucoup de facteurs sont à prendre en compte. On voit que le calcul du rail assimilé à une poutre est illusoire. Ce calcul ne peut donner que des informations partielles sur l'influence des divers paramètres, que l'on a essayé de dégager ci-dessus, ce qui est néanmoins déjà très précieux.

Lorsque la plate-forme est trop dure (rocher, par exemple), l'augmentation de l'élasticité du support de la voie peut être obtenue par augmentation de l'épaisseur de ballast, mais la variation n'est pas proportionnelle. Sur plate-forme meuble, au contraire, l'augmentation d'épaisseur de ballast améliore la répartition des pressions sur la plate-forme. Il faut donc tenir compte des caractéristiques de la plate-forme. Le calcul peut être fait par les formules de Boussinesq, ce que des mesures délicates ont confirmé. Bien entendu, l'influence de l'augmentation d'épaisseur est ici aussi dégressive.

Ainsi, par rapport aux pressions exercées par une traverse sur le ballast, la réduction de la pression au niveau de la plate-forme est de 30 % pour une épaisseur de ballast de 15 cm, 65 % pour une épaisseur de ballast de 30 cm, 80 % pour une épaisseur de ballast de 50 cm.

L'augmentation d'élasticité peut être également obtenue par l'introduction de semelles en caoutchouc entre rail et traverse. Cette possibilité est surtout importante pour les traverses en béton peu flexibles mais on est assez limité dans cette voie, sauf à recourir à des dispositifs d'attaches du rail compliqués, donc onéreux. De tels dispositifs sont utilisés sur les voies posées directement sur dalle en béton où des semelles en caoutchouc épaisses doivent obligatoirement être employées.

3. LES RAILS

3.1. Profils des rails. — On a vu au deuxième paragraphe l'intérêt de recourir à un rail relativement lourd, le choix de ce poids étant un problème économique dans lequel intervient au premier chef l'importance du trafic.

En France, depuis la création de la S.N.C.F., on n'utilise plus que trois profils de rails de 46, 50 et 60 kg/m. Ce dernier profil, d'ailleurs unifié par l'Union internationale des chemins de fer, n'est en fait utilisé que depuis 1958 sur les lignes les plus chargées. Les règles actuelles d'utilisation sont les suivantes :

— le rail 46 kg/m pour un trafic inférieur à 14 000 t par jour (et par voie),

— le rail 50 kg/m pour un trafic ne dépassant pas 30 000 t par jour (et par voie),

— le rail 60 kg/m pour un trafic supérieur à 30 000 t par jour (et par voie).

Il a été décidé en 1972 d'abandonner le rail 46 kg/m en pose neuve.

Tous ces rails sont du type Vignole (fig. I-3), qui comprend :

— Un champignon assez massif à la partie supérieure qui supporte et guide les roues ; seul le champignon s'use donc.

— Une âme : c'est la partie médiane amincie qui, comme dans une poutrelle ordinaire, a pour objet de résister aux efforts tranchants et de procurer l'inertie verticale avec le minimum de métal.

— Un patin relativement large, mince et plat qui repose sur les traverses et permet de fixerl e rail par des dispositifs simples et peu onéreux.

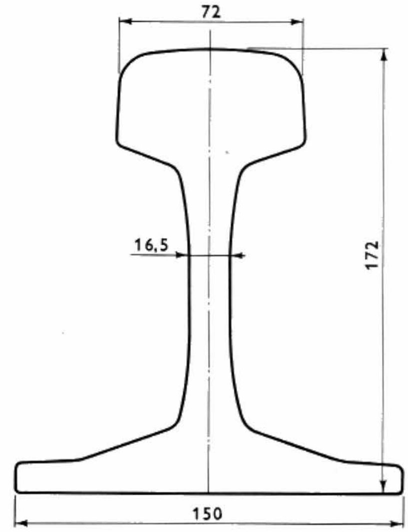


Fig. I-3
Rail U.I.C.
60 kg/m

Ce dernier avantage a, notamment, fait renoncer au rail à double champignon (fig. I-4) qui existe encore sur certaines lignes secondaires des régions Ouest et Sud-Ouest de la S.N.C.F., ainsi qu'en Grande-Bretagne. Le rail à double champignon, que l'on espérait pouvoir retourner (illusion car le champignon inférieur s'encoche) repose sur la traverse par l'intermédiaire d'un coussinet en fonte ; il est maintenu dans ce coussinet par un coin en acier à ressort qui, sous l'effort des vibrations, s'en va trop facilement.

Le rail à patin peut, au contraire, être posé directement sur des traverses en bois dur. On utilise néanmoins, dans les voies en courbe, des plaques métalliques laminées appelées *selles*, beaucoup moins onéreuses qu'un coussinet. Le patin, par sa largeur, confère en outre au rail une bien meilleure inertie transversale, ce qui est très important pour les voies en longs rails soudés, comme on le verra.

La forme massive du champignon est essentielle pour assurer un frettage convenable de la zone voisine du contact avec les roues où se développent des contraintes très importantes. Le bombement de la surface ne doit pas être trop important afin précisément de limiter ces contraintes. L'expérience a montré qu'au bout d'un certain temps, par suite du roulement, le profil se stabilisait. Dans la fabrication des rails modernes on a donc adopté un profil voisin de ce profil d'usure ce qui rend les contraintes minimales : le rayon de courbure au sommet est de 300 mm.

Les congés de raccordement âme-champignon et âme-patin ont été augmentés sensiblement pour éviter, dans ces zones, les fissures longitudinales que l'on constatait trop fréquemment sur les rails anciens et qui peuvent conduire à un détachement très dangereux du champignon.

La largeur du champignon ne doit pas être excessive pour éviter d'avoir des efforts systématiquement excentrés (qui

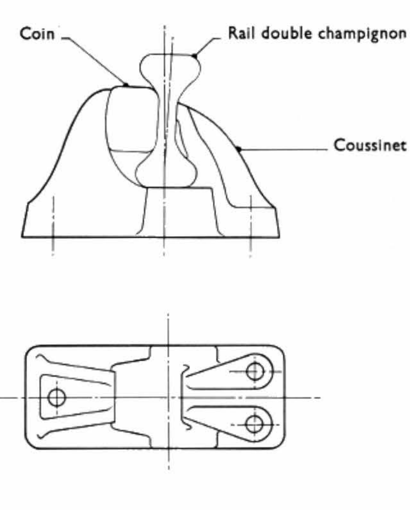


Fig. I-4

favoriseraient aussi les fissures dans les congés), la largeur de la voie devant rester la même quelle que soit la largeur du champignon du rail.

Les rails étant posés inclinés au 1/20, les joues du champignon sont également inclinées au 1/20. Les parties inférieure du champignon et supérieure du patin sont plates et inclinées avec la même pente pour permettre l'éclissage. Dans les joints éclissés, ces parties s'usent et il faut pouvoir compenser cette usure sans déplacement horizontal trop important; par ailleurs, on ne peut exercer des efforts de traction trop importants sur les boulons du fait du serrage. Un compromis était donc nécessaire: les profils modernes comportent une pente de 1/3 ou 1/2,75. Bien sûr ces considérations ont un peu perdu de leur importance avec le développement des longs rails soudés. Il faut néanmoins pouvoir éclisser un rail rompu en attendant son remplacement. Il faut aussi savoir que, même dans une voie en longs rails soudés, on est obligé d'utiliser des joints isolants pour le fonctionnement du circuit de voie.

Quant au patin, son épaisseur et la forme des ailes sont principalement dépendantes des facilités de laminage et d'équilibrage thermique entre section du patin et section du champignon.

Dans des ambiances corrosives, dans certains tunnels humides notamment, on est conduit à utiliser des profils spéciaux homologues des rails normaux utilisés à l'air libre, mais comportant une âme et un patin plus épais.

3.2. Qualité de l'acier à rail et fabrication des rails. — Malgré les sollicitations importantes du rail (on a vu que les efforts exercés peuvent atteindre et même dépasser 150 kN avec des charges nominales de roue voisines de 10 t) transmises par l'intermédiaire de faibles surfaces de contact, il n'est pas possible économiquement de recourir à des aciers spéciaux (la S.N.C.F. consomme 120 000 à 130 000 t de rails par an). Jusqu'à maintenant on utilisait de l'acier fabriqué au convertisseur Thomas, ayant une teneur en carbone assez grande et une résistance à la traction comprise entre 70 et 85 hbar.

Il importe cependant que cet acier ne soit pas fragile et le cahier des charges est très sévère à cet égard (essai de choc et minimum d'allongement de 10 % sur éprouvette de traction). L'acier ne doit évidemment pas comporter de zone de ségrégation excessive: des macrographies limites sont imposées, ce qui oblige les sidérurgistes à éliminer 20 à 25 % de la tête des lingots. Il ne doit pas y avoir de défauts de surface, de « pailles », d'où la nécessité pour les sidérurgistes d'apporter un soin particulier aux parois des lingotières.

Le processus de laminage est particulier afin d'avoir un bon corroyage. Une amélioration importante de la technique du laminage a permis de supprimer un défaut grave: la fente longitudinale du patin.

La spécification technique comporte donc les clauses suivantes:

— Analyse chimique.
— Essai de traction sur éprouvette.
— Macrographie.
— Essai de choc.
— Essai de dureté Brinell.

À titre indicatif, voici en ce qui concerne l'analyse les intervalles admis pour l'acier Thomas (70-85 hbar de résistance à la traction):

Carbone:	0,37 à 0,55 %
Manganèse:	0,70 à 1,20 %
Silicium:	$<$ 0,35 %
Phosphore:	$<$ 0,08 %
Soufre:	$<$ 0,06 %

En réalité, un peu de silicium et de nickel sont favorables à la résistance à l'abrasion.

Il y a bien entendu des tolérances dimensionnelles sur les différentes cotes de la section et des tolérances de linéarité des rails.

Malgré les précautions prises dans la fabrication, les rails comportent des inclusions non métalliques (silicates, aluminates) qui sont très dangereuses si elles ont des dimensions trop importantes car elles constituent des amorces de fissures. Les essais précédents ne permettent pas de déceler ces graves anomalies. Un très gros progrès a été réalisé par la mise au point, vers 1965, d'un appareil de contrôle continu de la propreté inclusionnaire des rails. Ce procédé, qui consiste à ausculter le champignon en appliquant sur une des joues une sonde à ultrasons, s'appelle le Ralus (fig. I-5). Tous les rails sans exception

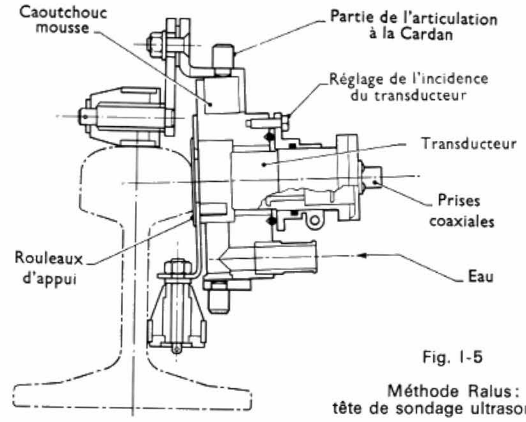


Fig. I-5

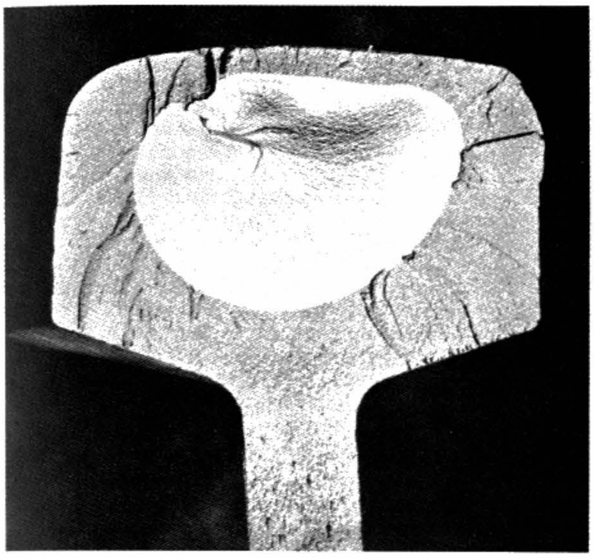
Méthode Ralus: tête de sondage ultrasonore

sont ainsi désormais contrôlés dans toutes les usines françaises. Suivant l'importance et le nombre d'échos enregistrés, on répartit les rails en cinq classes. Ceux de classe 5 sont rejetés par le producteur lui-même. Tous les autres sont acceptés mais on ne pose pas de rails de classe 4 sur les lignes principales et on s'efforce, dans la mesure du possible, d'affecter ceux de classes 0, 1 et 2 sur les lignes les plus chargées. Une proportion anormale de rails de classe 4, et a fortiori de classe 5, est l'indice d'une défectuosité dans la fabrication, à laquelle le producteur doit chercher à remédier dans les meilleurs délais.

L'intérêt de ce contrôle ultrasonique est considérable aussi bien pour l'utilisateur que pour le producteur. La validité du classement ainsi effectué a été confirmée par l'analyse statistique d'apparition des défauts de fatigue sur des rails mis en voie. Pour l'utilisateur, cela se traduit par une réduction très sensible du risque de rupture, générateur d'incidents de circulation et de dépenses, surtout lorsque le délai de garantie, fixé à cinq ans, est expiré; pour le producteur c'est un moyen de contrôle de la bonne marche de son usine; il peut redresser rapidement des erreurs et, bien entendu, le risque qu'il encourt pendant la période de garantie se trouve ainsi grandement réduit. Lorsque les rails sont fabriqués au four Martin, le défaut homologue au précédent est le flocon d'hydrogène qui peut avoir les mêmes conséquences que l'inclusion dans les rails Thomas. Le contrôle aux ultrasons permet également de déceler ces flocons.

Il faut signaler que le développement de l'acier soufflé à l'oxygène par les procédés Kaldo ou Olp en France permet, par une meilleure régularité de fabrication, d'améliorer notablement la propreté inclusionnaire des rails.

Le procédé Thomas ne permet d'ailleurs pas de fabriquer des rails de nuance supérieure à 85 hbar, et l'expérience a montré qu'il était préférable de se tenir un peu en deçà de cette limite. Or, si cette nuance d'acier donne satisfaction dans les conditions de trafic actuelles avec des charges par essieu qui sont de 13 t *en moyenne*, avec des charges plus grandes, cette nuance serait insuffisante. Des essais effectués sur un circuit russe ont montré qu'avec des essieux chargés systématiquement à 21 t, les rails de cette nuance périssent beaucoup trop vite par avaries superficielles (écrasement, exfoliation). Dès maintenant, pour limiter l'usure en chanfrein des rails en courbe de faible rayon (pouvant aller jusqu'à 1 000 m sur les lignes importantes), on est conduit à utiliser des rails de nuance supérieure à 90 hbar, qui ne peuvent être fabriqués que par le procédé Martin ou dans un convertisseur à l'oxygène. Dans des courbes très sévères, on utilise même des rails en acier au chrome (de nuance 105 hbar) mais il s'agit là de cas exceptionnels.



Tache ovale (*S.N.C.F.*)

3.3. Défauts et avaries des rails en voie. — Sauf en courbe de faible rayon et dans les voies déviées d'appareils de voie très fréquentées, où l'usure latérale peut atteindre des valeurs inadmissibles, les rails ne périssent jamais par usure (l'ordre de grandeur de l'usure verticale est de 1 mm pour 100 millions de tonnes de trafic).

Les progrès réalisés ont permis d'éliminer pratiquement les ruptures les plus dangereuses pouvant provoquer des déraillements : fissuration en étoile autour des trous d'éclissage, fissure au congé âme-champignon pouvant entraîner des lacunes importantes, ruptures franches multiples par fragilité du métal. Seuls subsistent actuellement, comme défauts, de beaucoup les plus importants :

— la fissure par fatigue ;

— les avaries de surface en pleine barre par suite de patinage ;

— les écrasements d'abouts aux joints.

3.3.1. La fissure par fatigue. — Elle part d'une inclusion ou d'un flocon et se développe soit horizontalement, soit transversalement : elle est alors inclinée à environ 30° par rapport à la verticale ; on l'appelle *tache ovale* (fig. I-6) du fait de son aspect caractéristique. Elle s'amorce toujours à une distance comprise entre 10 et 20 mm de la surface de roulement et conduit inévitablement à la rupture. La fissuration horizontale, tant qu'elle ne bifurque pas en tache ovale, n'est pas dangereuse.

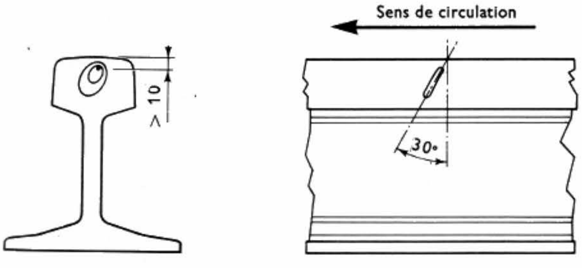


Fig. I-6 — Tache ovale

Il fallait donc absolument déceler ces défauts non visibles : on dispose pour cela de voitures d'auscultation utilisant à la fois les procédés magnétique et ultrasonique. Cette auscultation se fait à la vitesse de 20 à 25 km/h. Les programmes d'auscultation tiennent compte du trafic déjà supporté par les rails depuis leur mise en voie et la périodicité du contrôle est organisée de manière telle qu'entre deux auscultations le trafic écoulé ne dépasse pas 10 ou 12 millions de tonnes. Ces critères ont été fixés à la suite d'études faites sur la vitesse de propagation des fissures. L'appareillage dont on dispose maintenant permet d'évaluer approximativement le degré d'évolution des fissures.

Les rails affectés de fissures horizontales sont mis en observation. Ceux affectés de fissures transversales sont consolidés par éclissage provisoire et leur remplacement est obligatoire dans un délai déterminé. Très rarement, s'il y a risque de fissures multiples toujours dangereuses, un ralentissement des trains est imposé avec surveillance permanente jusqu'au remplacement qui doit bien entendu se faire dans les plus brefs délais.

Malgré l'augmentation du trafic et sa concentration sur des itinéraires bien équipés, malgré l'augmentation progressive du poids moyen par essieu, le nombre de rails rompus, et dont les avaries n'avaient pas été détectées, a été maintenu dans des proportions très raisonnables grâce à l'emploi de rails plus lourds, à la meilleure qualité générale de la géométrie de la voie et à ces auscultations périodiques. Moins de 2 % des retards de trains sont dus à des rails cassés et les déraillements sur rails cassés sont très rares. Avec l'amélioration des fabrications et de leur contrôle, on peut raisonnablement escompter une diminution des ruptures de rails.

3.3.2. Les avaries de surface par patinage. — Elles constituent le deuxième genre d'avarie d'une certaine ampleur. Les locomotives modernes utilisent au maximum l'adhérence roue-rail chaque fois que cela est avantageux. Une amorce de patinage est immédiatement arrêtée par des dispositifs d'antipatinage installés sur les locomotives mais, bien entendu, le rail est altéré au point où l'incident a eu lieu : une légère trempe s'est produite (apparition de martensite) qui dégénère plus ou moins rapidement en écaillage. En raison des surcharges dynamiques de roue plus importantes qu'entraînent ces avaries, et des concentrations de contraintes qui apparaissent, ces écaillages peuvent aussi dégénérer en fissures.

On étudie actuellement le phénomène en vue de trouver un remède préventif, si possible, mais pour le moment on ne connaît que des remèdes curatifs : le curetage de l'avarie et le rechargement à l'arc, opération délicate sur l'acier à rail, mais maintenant bien au point. Cette technique est très développée : elle entraîne des économies considérables de remplacement de rails et permet de différer des renouvellements en grand, dans la motivation desquels ces défauts intervenaient largement.

3.3.3. Les écrasements d'abouts des rails éclissés. Ces défauts, généralement non dangereux, peuvent être combattus également par la technique du rechargement à l'arc.

Ce défaut prendra bien sûr de moins en moins d'importance avec le développement des longs rails soudés.

3.4. Le soudage des rails. — Pour constituer des longs rails soudés, des barres de 36 m à partir des barres de 18 m, des rails mixtes de profils différents, pour effectuer des remplacements partiels, etc., on utilise le soudage électrique en atelier et le soudage par aluminothermie en voie. Les ateliers peuvent livrer des barres soudées électriquement atteignant 288 m de long qui, une fois mises en voie, sont soudées par aluminothermie pour constituer des rails soudés sur des longueurs quelconques.

3.4.1. Soudage électrique en bout par forgeage. — L'opération comporte trois phases successives :

— *Préchauffage :* par une série d'avances et de reculs (une vingtaine), on procède à des mises en contact successives de deux à trois secondes des abouts, au cours desquelles se produit un échauffement par effet Joule, l'intensité du courant étant de 36 000 à 38 000 A sous 5 à 12 volts.

— *Étincelage :* des vérins impriment à l'un des rails une avance continue de 0,25 à 1 mm/s. L'étincelage amène les surfaces des abouts au blanc soudant (V. fig. I-7).

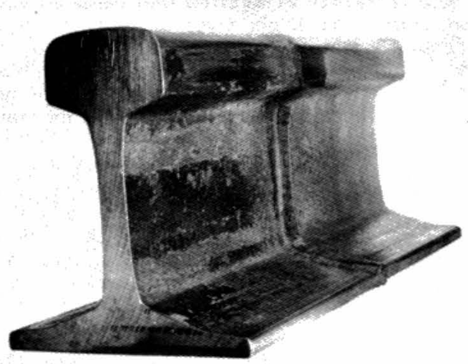
— *Forgeage :* par avance très rapide ; au cours de cette phase terminale, une liaison intime se produit et les oxydes liquides sont expulsés. Le bourrelet qui se forme est éliminé par burinage.



Fig. I-7

Soudage électrique ; phase d'étincelage (*S.N.C.F.*)

Fig. I-8 — Soudure électrique (*S.N.C.F.*)



Toutes ces opérations sont automatisées. Les paramètres de soudage fixés doivent être respectés et ils sont contrôlés par enregistrement. Le parachèvement comporte le meulage et le dressage. La qualité des soudures est ensuite contrôlée par des examens magnétoscopiques et attaques Fry. 150 000 soudures électriques sont exécutées chaque année dans les ateliers de la S.N.C.F. (fig. I-8).

3.4.2. Soudure aluminothermique. — On utilise la réaction du sesqui-oxyde de fer avec l'aluminium :

$$Fe_2O_3 + 2\ Al \rightarrow Al_2O_3 + 2\ Fe$$

Par addition d'éléments tels que silicium, manganèse, etc., on obtient un acier qui, bien que coulé, est sensiblement équivalent à l'acier laminé. Les charges utilisées ne sont pas les mêmes suivant la nuance des rails.

On utilise des moules préfabriqués. Après leur mise en place, un préchauffage des abouts de rails porte ceux-ci au rouge (800 °C). Dans un creuset réfractaire placé au-dessus du moule, on allume la charge de soudure. Après 15 ou 20 secondes, l'acier est coulé dans les moules et fait fondre les abouts de rails. Après un refroidissement de quelques minutes, on procède au démoulage et l'on tranche les excédents de métal ; on termine par un meulage soigné (fig. I-9).

L'ensemble des opérations demande 35 à 45 minutes. On a cherché à réduire ce temps en supprimant le préchauffage ; on y est parvenu en modifiant les charges de façon à augmenter la température de la réaction et permettre un apport de chaleur suffisant. Le coût de la charge est plus élevé mais le gain de temps est intéressant pour les réparations à effectuer entre le passage de deux trains.

Ces opérations doivent être exécutées avec beaucoup de soin, en suivant des règles précises pour éviter toute anomalie, et par suite, des ruptures. Bien entendu, on n'est pas à l'abri de certaines malfaçons, malgré les contrôles précis de l'opération de soudage électrique en atelier et l'éducation des soudeurs aluminothermiques sanctionnée par un examen d'agrément. Néanmoins, les ruptures de soudures en voie restent dans des proportions très acceptables. La soudure des rails, maintenant bien au point, constitue un progrès considérable en comparaison du joint éclissé qui est nécessairement un point faible de la voie.

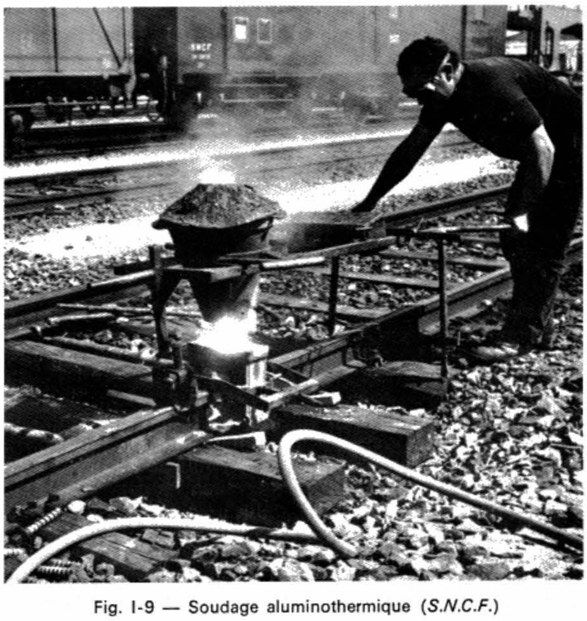


Fig. I-9 — Soudage aluminothermique (*S.N.C.F.*)

Toutefois, on n'a pas encore réussi à mettre au point une technique de soudure des rails sur les cœurs en acier moulé Hadfield au manganèse (12 à 14 % de manganèse) utilisés dans les appareils de voie depuis déjà longtemps. Il s'agit d'un acier hypertrempé, austénitique à la température ambiante qui, après écrouissage, acquiert une résistance remarquable aux chocs et à l'abrasion. Cette structure n'est évidemment pas stable. C'est pourquoi tout réchauffage est rigoureusement interdit. Néanmoins, moyennant de grandes précautions pour éviter tout échauffement local excessif, on a réussi à mettre au point une technique de rechargement à l'arc des défauts superficiels de ces cœurs. La soudure avec les rails voisins étant pour le moment impossible, on est obligé d'utiliser des joints éclissés. Mais on développe actuellement les appareils de voie soudés à la voie adjacente et l'on utilise des joints collés avec des résines époxy pour raccorder les cœurs au manganèse.

Cela conduit à dire quelques mots des éclissages.

3.5. Éclissage des rails. — Les longs rails soudés que l'on développe depuis 1950 en France ne sont toutefois réalisés qu'à l'occasion de renouvellement total de la voie ou de rails seulement. Il n'est généralement pas rentable de souder des rails en voie posés éclissés. De plus, pour des raisons de stabilité de la voie, il n'est pas possible d'équiper de longs rails soudés des voies en courbe de trop faible rayon.

L'éclissage a fait l'objet de nombreuses études. Chaque année, des inventeurs proposent des variantes de joints en biseau plus ou moins compliquées. Ces propositions sont systématiquement refusées car le plus grave inconvénient du joint ne réside pas dans la lacune mais dans le manque d'inertie verticale du joint. De ce fait, le choc des roues est inévitable.

De nombreux essais ont montré que le joint en porte à faux par rapport aux traverses voisines est préférable au joint appuyé, c'est-à-dire au joint dont la lacune est située au droit d'une traverse. La tenue du nivellement du joint est meilleure. Des éclisses longues donnent également de meilleurs résultats. On n'utilise plus désormais que des éclisses à six trous ayant une aussi forte inertie que possible. On est toutefois limité au point de vue épaisseur par la nécessité de pouvoir serrer facilement les tire-fond de fixation du rail sur la traverse (fig. I-10).

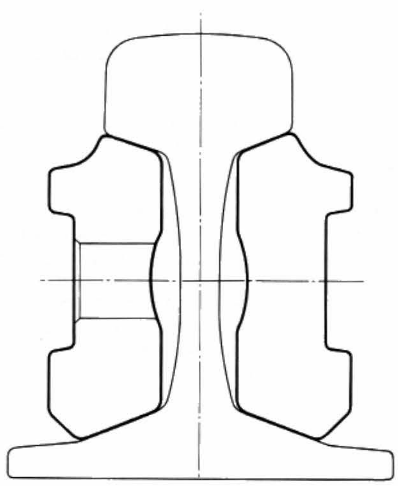


Fig. I-10
Éclisse pour rail U.I.C., 60 kg/m

Le joint permet la dilatation des rails et évite donc la naissance d'efforts thermiques importants dans les rails sous l'effet des variations de température. On a longtemps cru que cela était indispensable pour éviter des déformations de la voie. Il faut surveiller les lacunes des joints car si, par suite du cheminement longitudinal du rail, les lacunes deviennent trop faibles, des efforts thermiques trop élevés naîtront en été et provoqueront des déformations de la voie bien plus facilement que dans les longs rails soudés, par suite de la moindre inertie des joints. Le joint éclissé demande beaucoup d'entretien pour maintenir un assemblage et un nivellement correct. La S.N.C.F. est certainement dans ce domaine à l'avant-garde de la technique en matière d'entretien des joints.

Les longs rails soudés suppriment ce problème, mais on est obligé de conserver des joints isolants pour les circuits de voie électriques. Ceux-ci sont constitués par des assemblages collés avec des résines époxy, et serrés par boulons à haute résistance. De tels joints peuvent résister longitudinalement à des efforts thermiques de plus de 1 000 kN sans s'ouvrir, et ont une grande rigidité verticale. Ils ne demandent pratiquement pas d'entretien.

3.6. Travail des rails. — On a exposé au paragraphe 2 comment le rail travaille en flexion verticale. Soumis également à des efforts horizontaux, d'ailleurs excentrés, il travaille donc en flexion composée et aussi en torsion, problèmes encore plus difficiles à étudier que la flexion verticale. On ne les abordera pas car ce ne sont pas les problèmes essentiels.

Le contact rail-roue se fait par une ellipse relativement petite. Tant que la limite élastique n'est pas dépassée, la pression au centre de cette ellipse peut être calculée par la théorie de Hertz (en première approximation car on n'est pas en milieu indéfini). Cette pression p_0 est proportionnelle à la racine cubique de la charge Q d'une roue. La formule approchée suivante permet de la calculer:

$$p_0 = 285\,Q^{1/3}\left[\frac{1}{r}\left(\frac{1}{\rho_r}-\frac{1}{\rho_b}\right)\right]^{1/3}$$

Dans cette relation on exprime:

p_0: en hectobars;

Q: en milliers de décanewtons (10^3 daN);

r: rayon de la roue en mètres;

ρ_b: rayon de courbure transversale du bandage de roue en millimètres;

ρ_r: rayon de courbure transversale du rail en millimètres.

Dans le cas d'une roue fraîchement reprofilée: $\rho_b = \infty$ et pour le rail: $\rho_r = 300$ mm.

Pour $Q = 10.10^3$ daN et pour un diamètre de roue de 1 m, p_0 est proche de 90 hbar, valeur très supérieure à la limite élastique de l'acier à rail. Si le bandage a atteint le profil d'usure $\rho_b = 400$ mm, p_0 décroît et sa valeur est environ dix fois moindre.

L'influence de la courbure du profil de bandage est considérable. Selon Johnson (1), si p_0 reste inférieure à quatre fois la limite d'écoulement plastique en cisaillement simple (qui est seulement de 30 hbar environ pour l'acier à rail ordinaire), l'écoulement plastique cesse après des cycles répétés de roulement, et l'on se retrouve en milieu élastique. Avec des roues à bandages neufs, de 10.10^3 daN de charge nominale, provoquant des charges dynamiques pouvant atteindre 15.10^3 daN, cette condition n'est pas vérifiée pour l'acier à rail ordinaire, et des avaries de surface se produiraient inévitablement.

Dans les conditions actuelles du trafic, avec une charge moyenne de 13.10^3 daN par essieu, du fait que la plupart des roues est au profil d'usure il y a effectivement adaptation, comme on le constate en pratique. Mais dans des conditions de trafic plus sévères, l'utilisation d'un acier à rail plus résistant serait indispensable.

Une fois l'écrouissage réalisé près de la surface du rail, les contraintes résiduelles principales ont une moyenne négative; en d'autres termes, il règne une pression hydrostatique importante qui empêche la fissuration par fatigue. Celle-ci peut se produire plus bas, là où la pression hydrostatique est faiblement négative ou positive. Les fissures de fatigue naissent effectivement à une profondeur généralement supérieure à 10 mm, ne se développent pas ou peu vers le haut, mais vers le bas. Encore faut-il qu'une amorce de fissure due à une inclusion non métallique, provoquant une forte concentration des contraintes internes, existe car à ce niveau les contraintes de cisaillement produites par le roulement ne sont pas très grandes.

D'après ce que l'on vient d'exposer, on comprend bien le mécanisme d'apparition des taches ovales, fissures de fatigue, et l'on conçoit qu'à cet égard la nuance de l'acier joue un rôle très secondaire. Cette nuance est beaucoup plus importante en ce qui concerne les avaries super-

(1) « A shakedown limit in rolling contact » National Congress of Applical Mechanic, 1962, New York.

ficielles. Toutefois, la propreté de l'acier est importante dans les phénomènes de fatigue.

D'après les formules précédentes, on voit aussi qu'on est conduit à limiter la charge P des essieux en fonction directe du diamètre de roue D. La valeur limite du rapport $\frac{P}{D}$ doit cependant diminuer quand la vitesse augmente, car corrélativement les efforts dynamiques croissent.

La valeur limite admissible de la charge P pour un diamètre de roue D ne peut être déterminée en s'imposant seulement de maintenir le rapport $\frac{P}{D}$ constant car il faut prendre en considération les charges dynamiques réelles de roue, fonction du type de véhicule et de la vitesse. Actuellement, pour les wagons jusqu'à 120 km/h, on admet les valeurs suivantes de charges d'essieu en fonction du diamètre des roues :

$D = 920$ mm	$P = 20.10^3$ daN
$D = 840$ mm	$P = 18.10^3$ daN
$D = 760$ mm	$P = 16.10^3$ daN
$D = 680$ mm	$P = 14.10^3$ daN

4. LES TRAVERSES ET LEURS ATTACHES

4.1. Les traverses en bois et leurs attaches. — La situation particulière des ressources forestières de la France donne un avantage économique indéniable à la traverse en bois dur de bonne qualité, chêne ou hêtre ; par ailleurs, le consortium forestier du Gabon fournit à la S.N.C.F. d'excellentes traverses en bois exotiques. C'est la raison principale pour laquelle la majorité des voies françaises est posée sur bois. De plus, le fait que cette voie est isolante a conduit à utiliser ce matériau pour l'équipement de toutes les grandes artères où la signalisation implique le circuit de voie.

Les traverses en bois ont 2,60 m de longueur, 26 cm de largeur et 15 cm d'épaisseur, tout au moins celles posées sur les lignes importantes. Ces traverses sont relativement légères (80 kg) et assez flexibles, ce qui est avantageux, pour les grandes vitesses comme on l'a vu. Elles sont systématiquement créosotées sous pression pour éviter le pourrissement et frettées en atelier à leurs extrémités par des cercles métalliques pour éviter l'ouverture de fentes. Leur seul inconvénient est leur durée de vie malgré tout limitée à cause des avaries du bois du fait du travail des attaches du rail, des fentes, des incrustations du rail ou des selles.

Au bout de vingt-cinq à trente ans, parfois moins, sur les lignes importantes, il faut procéder au renouvellement des traverses. Les rails qui, à ce moment, ont supporté 300 millions de tonnes et plus, doivent également être renouvelés. Donc la voie est entièrement remplacée par des éléments neufs afin d'éviter des dépenses d'entretien excessives. Les traverses et les rails récupérés sont triés, régénérés en atelier et réutilisés sur des lignes secondaires. Sur ces dernières lignes, on ne renouvelle jamais complètement les traverses en bois ; on les remplace au fur et à mesure, solution qui dans ce cas est plus économique.

Toujours pour des raisons économiques, le type de pose de voie est strictement adapté aux efforts que subit cette voie. C'est ainsi que l'on distingue deux types de pose, suivant les rayons de courbe.

● *En alignement et en courbes de grands rayons,* où les efforts transversaux sont faibles, le rail est posé sans selle sur la traverse en bois rabotée à cet effet (fig. I-11). Il est fixé à l'aide de deux attaches doublement élastiques classiques en France depuis 1952. Ces attaches comportent dans leur principe général :

— Une semelle en caoutchouc cannelée placée entre le rail et la traverse, de 4,5 mm d'épaisseur.

— Un ressort constitué par une simple lame d'acier en forme, percée en son milieu, s'appuyant d'un côté sur la traverse, de l'autre côté sur le patin du rail, assez près de l'âme.

— Un dispositif de mise en tension du ressort constitué par un tirefond vissé dans la traverse et passant dans le trou central. La forme du ressort est étudiée de façon que la



Fig. I-11 — Pose sur traverses bois sans selle (*S.N.C.F.*)

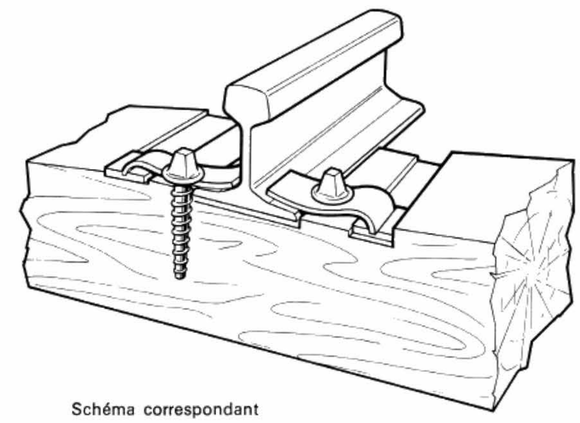


Schéma correspondant

distance de la lame au bord du patin, qui diminue lorsque la tension du ressort augmente, s'annule lorsque le serrage optimal est atteint.

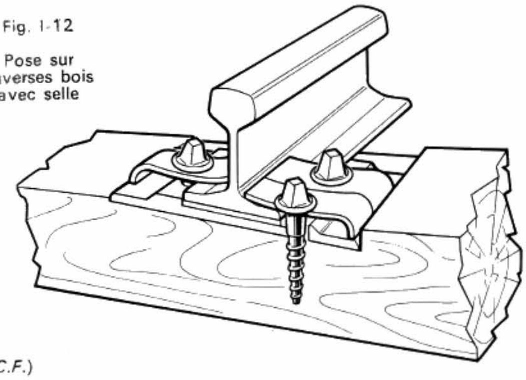
L'effort exercé par le tirefond sur le ressort est de 15 kN environ ; l'effort exercé sur le rail par la lame du ressort étant environ moitié moindre. Grâce à ces ressorts, les tire-fond sont très peu sollicités au passage des charges. Par suite ils ne nécessitent que des resserrages très espacés. Dans le cas de la pose sur bois sans selle, la forme du ressort (ou griffon) est extrêmement simple et une petite plaquette empêche de pénétrer dans le bois l'extrémité de ce ressort reposant sur la traverse. De plus, dans ce cas particulier, il n'y a que quatre attaches par traverse, soit deux par rail. Sur chaque traverse, le rail est donc serré avec un effort de 30 kN environ. Bien que d'une très grande simplicité et rusticité, et par suite d'un prix relativement bas, ce type de pose supporte les plus lourdes charges et les plus grandes vitesses sans nécessiter aucun dispositif spécial pour empêcher le cheminement longitudinal du rail.

On a cherché à éviter toute perte de contact du ressort avec le rail sous l'effet des vibrations de ce dernier, dont les fréquences les plus élevées atteignent 1 000 Hz, en réalisant des ressorts ayant une fréquence propre nettement supérieure.

● *En courbes de rayons inférieurs,* les efforts transversaux et verticaux devenant plus importants, le rail est posé sur la traverse par l'intermédiaire d'une semelle en acier pour réduire les pressions sur la traverse (fig. I-12). La semelle en caoutchouc est posée entre selle et rail, les griffons d'une forme très légèrement différente s'appuient sur la selle en acier et il y a cette fois-ci six attaches par traverse, soit trois par rail. Les rayons limites fixant les domaines d'emploi propre de ces deux types de pose dépendent du type de rail et de la vitesse plafond de la ligne, car on recherche l'optimum économique entre le prix de premier

Fig. I-12

Pose sur traverses bois avec selle



(*S.N.C.F.*)



établissement et les frais d'entretien. Ces limites sont indiquées dans le tableau ci-après:

Rayons limites de pose avec ou sans selle sur traverses en bois

Profil de rail \ Vitesse	V < 160 km/h	V > 160 km/h
60 kg U 80	1500 à 2000 m (1)	2000 m
50 kg U 36	1200 à 1500 m (1)	
46 kg U 33	800 à 1200 m (1)	

(1) Dans cet intervalle le rayon limite est déterminé en fonction du trafic de la ligne et de l'agressivité des engins moteurs notamment.



Fig. I-13 — Voie posée sur traverses en béton précontraint monobloc VW (*S.N.C.F.*)

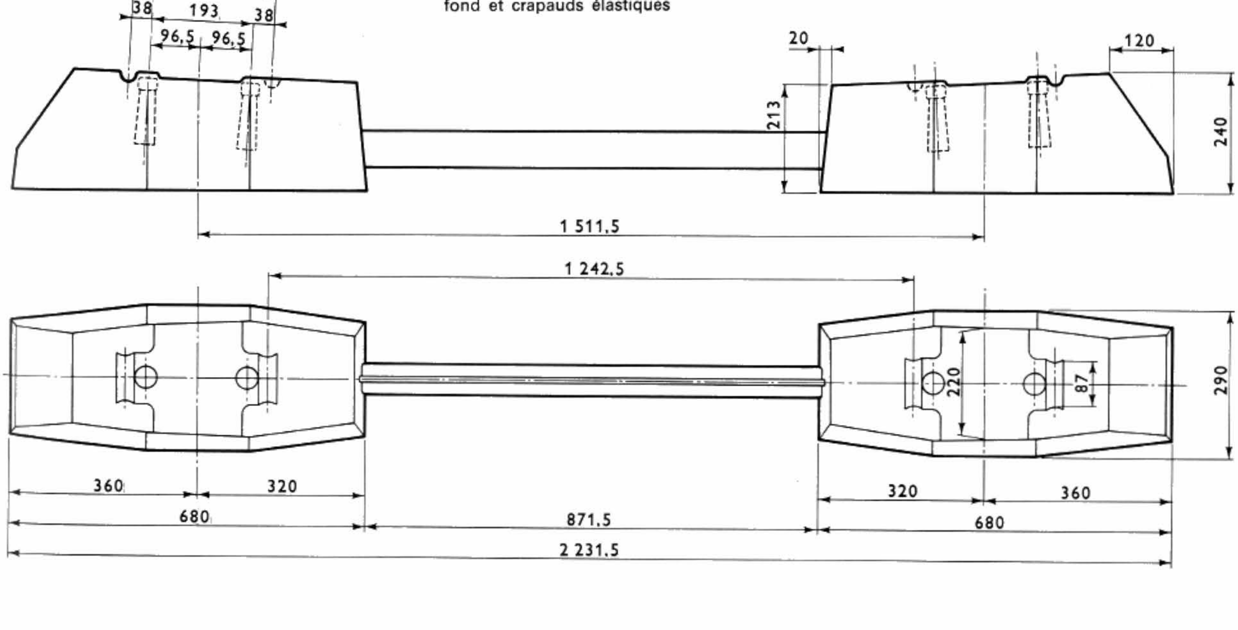
4.2. Les traverses en béton et leurs attaches. — Depuis très longtemps la S.N.C.F. avait essayé d'utiliser le béton pour la fabrication des traverses mais c'est seulement après la seconde guerre mondiale et grâce aux attaches élastiques mises au point en France qu'elle a pu développer l'emploi de telles traverses. Bien que les traverses françaises en béton soient d'un coût relativement faible, comparativement à certaines traverses étrangères, elles étaient cependant plus onéreuses que le bois et cela en a limité l'emploi. Toutefois, les prix se rapprochent maintenant et, compte tenu de la durée de vie escomptée de ces traverses (au moins quarante ans) et de l'augmentation relative du coût de la main-d'œuvre, l'emploi de ces traverses va se développer sensiblement dans les années à venir. La résistance latérale de la voie étant plus grande avec des traverses en béton, les nouvelles lignes à très grande vitesse sont équipées de telles traverses:

Trois types de traverses ont été ainsi mis au point:

— Une traverse en béton précontraint monobloc VW (fig. I-13).

— Deux traverses mixtes, Vagneux et SL (dérivée de l'ancienne traverse S.N.C.F.-RS), qui comportent deux blocs en béton armé reliés par une entretoise métallique en acier à rail (fig. I-14 et I-15).

Fig. I-14 — Traverse Vagneux pour attaches axiales par boulons tire-fond et crapauds élastiques



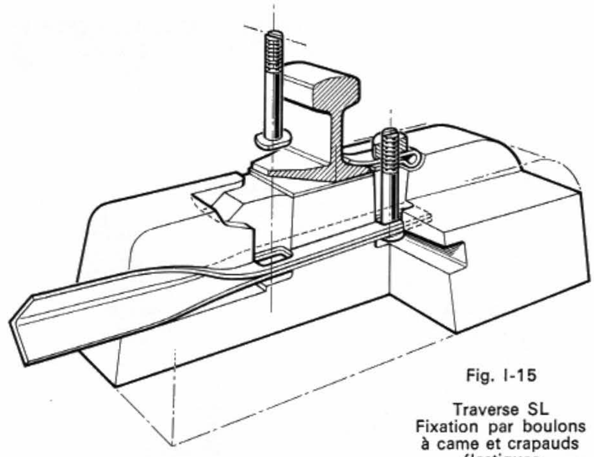


Fig. I-15

Traverse SL
Fixation par boulons à came et crapauds élastiques

Pour ces dernières, étant donné la faible longueur des blochets, une assez faible densité d'armatures permet d'éviter toute fissuration sous charge, sans avoir recours à la précontrainte.

Les entretoises en acier à rail sont peu sensibles à la corrosion et peuvent même être entièrement noyées dans le ballast sans inconvénient. La résistance transversale de la voie est alors très importante. Les deux types de traverses mixtes, dont la forme des blochets est très voisine, diffèrent essentiellement par l'entretoise (fer en Y pour la traverse Vagneux, cornière tordue pour la SL) et par le mode d'ancrage de l'attache dans le blochet; boulon tire-fond vissé dans une gaine en matière plastique noyée dans le béton pour la Vagneux (fig. I-16), boulon à tête

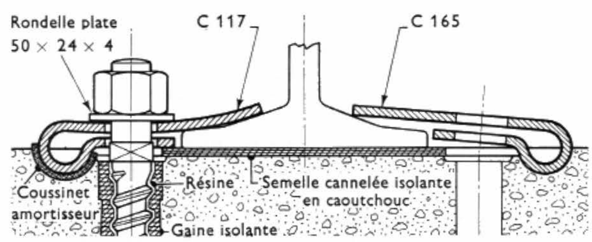


Fig. I-16 — Isolement électrique des traverses en béton armé Vagneux avec gaine isolante

marteau comportant une came s'appuyant dans une lumière rectangulaire de l'entretoise pour la SL (fig. 1-17).

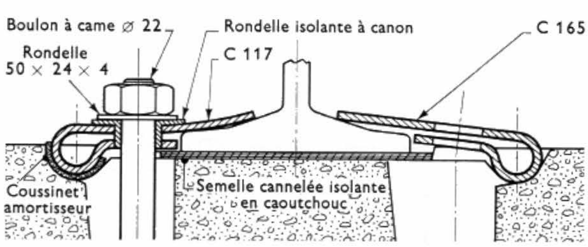


Fig. I-17 — Isolement électrique des traverses en béton armé type SL

Les ressorts de fixation, qui portent le nom de « crapauds », sont les mêmes pour les trois types de traverses. Ils sont un peu plus compliqués que les « griffons » des traverses en bois car ce sont eux qui absorbent les efforts transversaux et les reportent sur le béton. Pour cela, la partie reposant sur la traverse forme une boucle de 18 mm et se prolonge par une languette revenant sous la lame principale pour venir buter sur le bord latéral du patin. La boucle est engagée dans une cuvette de 18 mm de diamètre, ménagée dans le blochet, sur laquelle se trouve donc reporté l'effort transversal exercé sur le rail.

En courbe de faible rayon, les efforts trop importants naissant au contact du fer et du béton risquent d'épaufrer celui-ci. Les crapauds extérieurs au rail sont alors diffé-



Fig. I-18 — Voie posée sur traverses mixtes en béton (*S.N.C.F.*)

rents: la boucle n'est plus que de 15 mm; elle repose dans la cuvette par l'intermédiaire d'un coussinet semi-cylindrique en élastomère de 3 mm d'épaisseur.

Dans tous les cas, il n'y a que quatre attaches par traverse, même dans les courbes de faible rayon. On descend actuellement jusqu'à 300 m de rayon en longs rails soudés. On n'utilise jamais de selle: le rail repose sur le béton par l'intermédiaire d'une semelle cannelée en caoutchouc (fig. I-18). Dans les réalisations les plus récentes, la semelle est deux fois plus élastique que celle utilisée sur les traverses en bois. Bien entendu, aucun dispositif anticheminant n'est nécessaire. Ces traverses et leurs attaches ne demandent aucun entretien.

On ne parlera pas des traverses métalliques car elles ne sont plus utilisées en raison de leur coût nettement supérieur à celui des traverses en béton, même compte tenu de leur valeur de récupération en ferraille.

4.3. Les poses directes de voies sur dalles en béton. — Dans certains cas spéciaux, souterrains, ouvrages d'art, il n'est pas possible de réaliser la voie classique sur ballast. On est donc amené à poser la voie directement sur une charpente métallique ou une dalle en béton, en utilisant des semelles épaisses en caoutchouc pour obtenir l'élasticité et l'amortissement indispensables.

Dans une optique différente, en voie courante, on peut chercher à assurer une répartition des charges sur une plate-forme plus étalée en substituant aux traverses des dalles en béton simplement armé ou précontraint. Cette disposition ne pourrait présenter un intérêt qu'en ce qui concerne la réduction des opérations d'entretien du nivellement et du dressage. Selon les estimations faites par la S.N.C.F., le supplément de coût de telles poses sur plate-forme meuble ne peut être amorti par des économies sur les travaux d'entretien de la voie. Néanmoins, une réalisation sera faite à titre d'essai sur une plate-forme meuble assez médiocre.

Ces poses directes doivent assumer deux fonctions: d'une part, assurer le maintien de la géométrie de la voie, d'autre part, assurer au rail une souplesse au moins égale à celle procurée par les traverses, le ballast et la plate-forme dans la voie ordinaire. Il faut donc un système qui soit à la fois résistant et souple. La réalisation en est assez malaisée et c'est ce qui explique le grand nombre actuel de solutions proposées.

Ces poses sont onéreuses, en particulier l'obtention de la résistance aux efforts transversaux est coûteuse; c'est pourquoi il est ici absolument indispensable d'adapter le type de pose aux efforts.

Trois types de pose ont été essayés; les deux premiers ont été étudiés par la S.N.C.F.:

— Une pose lourde, en place depuis 1966 au souterrain de Sainte-Dévote à Monaco, dans une courbe de 350 m de rayon, se comporte remarquablement bien et ne donne

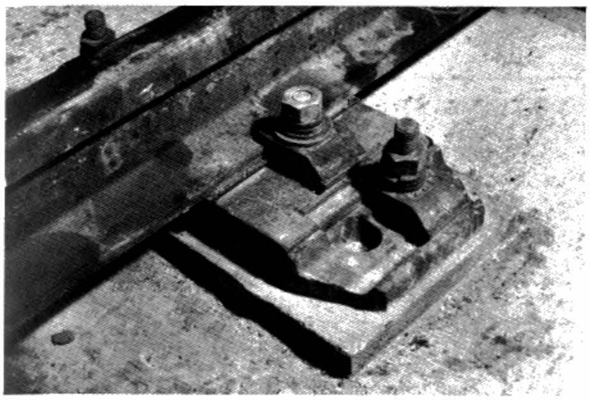


Fig. I-19 — Pose de voie directe sur béton à Monaco (*S.N.C.F.*)

lieu à aucune opération d'entretien ; cependant étant très chère, elle est abandonnée (fig. I-19).

— Une pose plus légère, dite S.N.C.F.-G, est en service sur certains ouvrages d'art et dans une tranchée rocheuse au sud de Limoges sur la ligne Paris-Toulouse (fig. I-20).

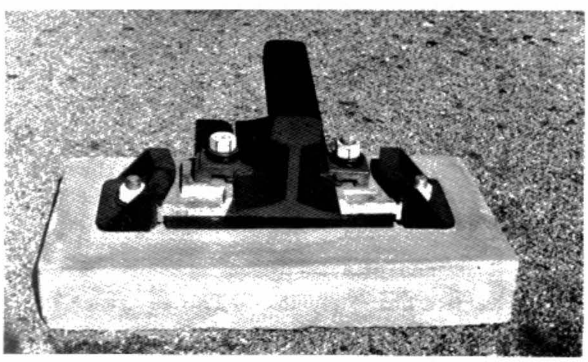


Fig. I-20 — Pose de voie sans ballast S.N.C.F.-G

Ces poses comportent une selle en acier fixée au rail reposant sur une semelle épaisse en élastomère assurant l'élasticité du système. Cette disposition est indispensable si l'on veut éviter un trop grand déversement du rail sous l'action des efforts transversaux, tout en ayant une grande souplesse dans le sens vertical. Les boulons d'ancrage dans le béton, la selle inférieure de la pose Monaco, les butées de la pose S.N.C.F.-G, sont collés au béton par résines époxy.

— Un troisième type étudié par M. Sonneville est constitué par des traverses en béton dont les blochets comportent un chausson en caoutchouc dur et une semelle en caoutchouc cellulaire. Ce type est relativement simple mais plus épais que les deux précédents (fig. I-21).

Les solutions françaises aux problèmes technologiques de la voie ferrée sont, on le voit, multiples : elles ont l'avantage de permettre une étroite adaptation de la technique aux conditions d'exploitation, en permettant dans chaque cas de réaliser la solution à la fois la plus fiable et la plus économique.

5. LE BALLAST ET LES SOUS-COUCHES

On a déjà indiqué au paragraphe 1 différents rôles très importants que remplit le ballast : système élastique et amortisseur il permet des corrections faciles du nivellement et du dressage de la voie et il répartit les charges sur la plate-forme. Il faut ajouter le rôle fondamental qu'il joue dans la résistance de la voie aux déformations transversales. De plus, les vides importants qu'il comporte évitent un encrassement rapide qui altérerait la qualité du nivellement de la voie. Bien entendu, il doit toutefois être périodiquement épuré. Cette opération se fait généralement à l'occasion des renouvellements de voie, à l'aide de machines puissantes qui prélèvent le ballast sous les traverses, le criblent en rejetant les détritus fins sur les remblais en tranchée ou sur des wagons pour être évacués à la décharge.

Pour avoir une voie stable, le ballast doit donc obligatoirement être constitué d'éléments anguleux, donc concassés, et durs, qui « accrochent » bien, et non gélifs. Sa granulométrie a été fixée à 20/60 mm. On utilise du granit, des calcaires durs, des pierres siliceuses et du laitier de haut fourneau concassé (bien entendu, dans les voies de services ou les voies de gares où l'on circule lentement, la qualité du nivellement de la voie a beaucoup moins d'importance, et l'on se contente de sables ou de graviers tout-venant de rivière ou de carrière, moins onéreux).

Outre sa granulométrie, on contrôle la dureté des éléments du ballast et leur résistance à l'usure par l'appareil Deval. Le coefficient Deval doit être supérieur à 14 (on accepte parfois 12).

Sauf sur les plates-formes de bonne qualité (rochers, graviers), on ne dispose pas directement le ballast sur la plate-forme. Une sous-couche est interposée : elle peut elle-même comporter plusieurs couches d'éléments de granulométrie progressive. Ainsi, sur les plates-formes argileuses, la première couche sera en sable fin formant écran aux remontées d'argile et volant hygrométrique, la seconde sera en gravier. Chacune de ces couches, de par sa granulométrie, doit remplir vis-à-vis de celles qui sont en contact avec elle les conditions de drainage et de non mélange de Terzaghi.

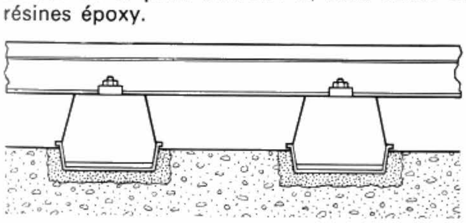
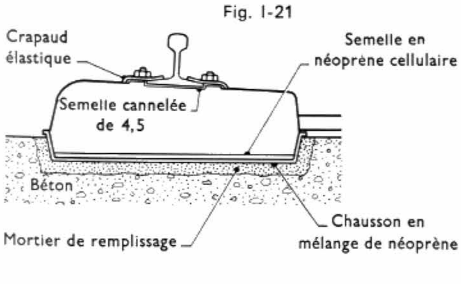


Fig. I-21





Pose de voie sans ballast ; traverses en béton avec chaussons élastiques brevet Sonneville (*S.N.C.F.*)

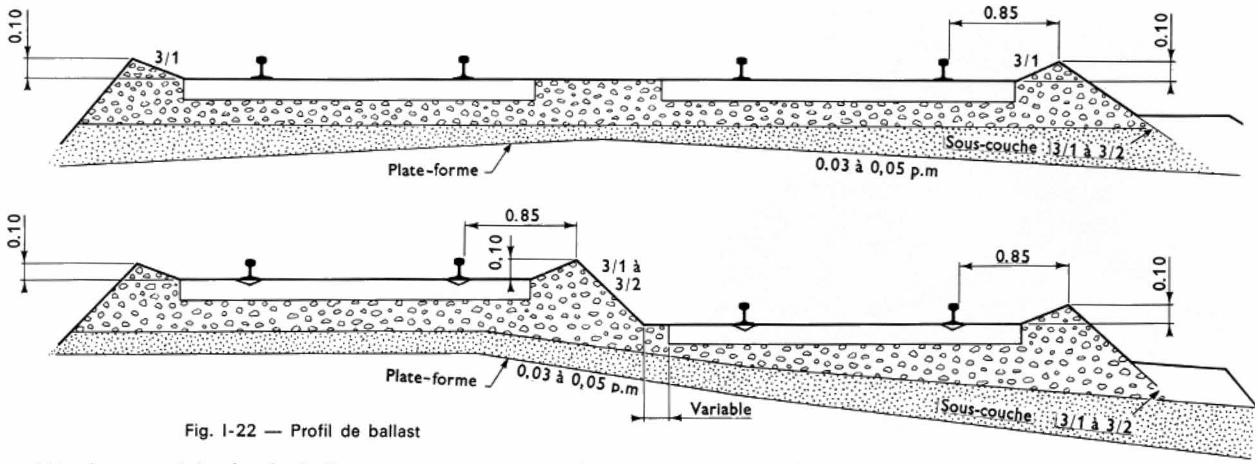


Fig. I-22 — Profil de ballast

L'épaisseur minimale de ballast sous traverse est de 15 cm, l'épaisseur totale, sous-couches comprises, varie avec la nature de la plate-forme. L'ensemble fait toujours au minimum 30 cm sur les grandes lignes. Un profil en travers type est donné par la figure I-22.

Le rôle des banquettes de ballast en extrémité de traverse est essentiel dans les voies en longs rails soudés pour assurer la stabilité propre de la voie lorsque les rails sont le siège de contraintes thermiques importantes. En courbe, ces banquettes sont surhaussées pour augmenter la butée des traverses.

Le « lit de ballast » dans lequel les traverses sont noyées confère à la voie une résistance transversale très largement suffisante en toute circonstance lorsqu'il est compacté. Ce compactage peut être réalisé artificiellement par dameuses vibrantes lorsque l'on désire « stabiliser » la voie rapidement. Il se produit aussi naturellement par le passage des trains suivant une loi logarithmique en fonction du tonnage supporté. Après passage d'un trafic de 100 000 t, le ballast a atteint 70 % de sa compacité maximale.

Toute opération de correction des défauts géométriques de la voie en nivellement et en tracé qui exige un remaniement du ballast entraîne inévitablement une altération plus ou moins importante de sa compacité. Ces opérations sont interdites sur les voies en longs rails soudés pendant la période estivale et des règles strictes sont édictées à cet égard, pour éviter toute déformation de la voie. Mais en dehors de cette période, les travaux d'entretien doivent pouvoir être exécutés entre les trains sans pour autant imposer à ces derniers des limitations de vitesse.

Les efforts transversaux exercés sur la voie par les divers véhicules moteurs ou remorqués doivent donc être inférieurs à une certaine valeur limite qui est celle relative à une voie partiellement déconsolidée par une opération d'entretien.

Ces remarques conduisent à étudier, d'une part, la stabilité de la voie non chargée mais dont les rails sont le siège de contraintes thermiques, d'autre part, la stabilité de la voie chargée sous l'action des efforts transversaux exercés par les essieux.

6. LA VOIE EN LONGS RAILS SOUDÉS *(LRS)* ET SA STABILITÉ

6.1. Comportement de la voie en *LRS* dans le sens longitudinal. — Dans une telle voie, qui peut atteindre des dizaines de kilomètres sans aucun joint (sauf des joints isolants collés ne permettant aucune dilatation), seules les extrémités des *LRS* peuvent se dilater. Mais cette dilatation est contrariée par la résistance r au déplacement longitudinal des traverses dans le ballast, qui est de l'ordre de 6 kN par mètre de voie lorsque le ballast n'est pas compacté, le double lorsqu'il l'est (12 kN). Entre ces deux « zones de respiration » les rails ne peuvent se dilater. Si ces rails ont été fixés sur les traverses à une température t_0, à une température t ils seront donc le siège de contraintes de compression si $t > t_0$, de traction si $t < t_0$, dont la valeur est donnée par la formule :

$$\sigma = E\alpha\,(t - t_0)$$

E : module d'Young ($E \approx 20\,000$ hbar) ;
α : coefficient de dilatation de l'acier à rail

$$(\alpha = 11{,}5 . 10^{-6}\ °C^{-1})$$

soit : $E\alpha \approx 23$ bars par degré Celsius.

En France, compte tenu des températures extrêmes du rail (— 15 °C, + 55 °C), exceptionnellement (— 25 °C, + 60 °C), on fixe les *LRS* à 26 °C ± 6 °C, c'est-à-dire à une température comprise dans l'intervalle 20-32 °C.

Ces contraintes ne dépassent donc généralement guère 10 hbar, ce qui conduit néanmoins à des efforts F de compression ou de traction de plus de 700 kN dans chaque rail. On voit ainsi que les zones de respiration peuvent atteindre une longueur L égale à :

$$L = \frac{2\,F}{r} = \frac{2 \times 700}{12} = 115 \text{ m}$$

Le déplacement des extrémités du *LRS* se calcule par la formule :

$$\delta = \frac{FL}{2\,ES} = \frac{ES\,\alpha^2\,(t - t_0)^2}{r}$$

où S est la section du rail. Ces valeurs sont voisines de 30 mm. On constate parfois davantage (fig. I-23).

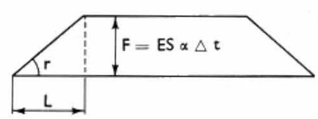


Fig. I-23

$\Delta t = t - t_0$

Entre deux *LRS* successifs, l'emploi d'appareils de dilatation est indispensable. Si le *LRS* est suivi de rails éclissés, on peut à la rigueur s'en dispenser mais cela conduit à faire travailler assez fortement les boulons d'éclisses. Sur les réseaux de la S.N.C.F., on a préféré continuer à utiliser de tels appareils mais grâce à la technique des joints isolants collés et aussi à la nouvelle technique de soudure des appareils de voie, on en utilise de moins en moins.

6.2. Stabilité de la voie non chargée lorsque les rails sont en compression

6.2.1. Stabilité en vertical : risque de soulèvement. — Dans ce phénomène le facteur stabilisant est le poids de la voie et les forces de frottement du ballast sur les faces latérales des traverses.

Soit $2\,\overline{\omega}$ l'ensemble de ces forces par unité de longueur de voie (3 kN/m). La théorie que l'on peut développer ici aboutit à l'expression suivante du soulèvement critique f, c'est-à-dire la valeur dont il faut soulever la voie pour qu'elle devienne en équilibre instable et, par suite, flambe dès que cette valeur est tant soit peu dépassée :

$$f = 15{,}75\,\frac{EI_v\,\overline{\omega}}{F^2}$$

I_v : inertie verticale du rail ;
EI_v : rigidité verticale (42 000 kN . m² pour le rail 50 kg, par exemple).

La longueur de l'onde critique est donnée par la formule :

$$L = 9\sqrt{\frac{EI_v}{F}}$$

On aboutit à des valeurs voisines de 15 cm sur 20 m lorsque F atteint les plus fortes valeurs.

Une voie ne présente évidemment jamais de tels défauts. On montre qu'elle peut se soulever très légèrement, par suite des défauts de nivellement mais elle ne peut pas flamber verticalement.

6.2.2. Stabilité en transversal : risque de déformation dans le plan de la voie. — Le problème est plus compliqué qu'en vertical. La théorie aboutit aux expressions suivantes de la flèche et de la longueur d'onde critique :

$$f = 13{,}8\,\frac{EI_t\,\tau}{(F - K)^2}$$

$$L = 12{,}56\sqrt{\frac{EI_t}{F - K}}$$

où I_t est l'inertie transversale du rail, 2 τ la résistance transversale au déplacement offerte par le ballast par unité de longueur de voie, K la résistance au pivotement horizontal du rail sur les traverses, du fait de son poids et du serrage des attaches.

Si C est le couple nécessaire pour faire tourner d'un angle θ un coupon de rail placé sur une traverse et si l est l'espacement des traverses :

$$K = \frac{C}{\theta\, l}$$

K a donc les dimensions d'une force.

Lorsque le ballast n'est pas compacté, 2 τ est voisin de 10 kN/m pour une voie sur traverses en bois ; il atteint le double lorsque le ballast est bien compacté. K est proche de 150 kN. Pour une voie en rail 50 kg, par exemple, EI_t = 840 kN.m² ; on aboutit à des flèches critiques de 20 cm et 10 cm sur 15 m respectivement lorsque le ballast est compacté et lorsqu'il n'est pas compacté, et pour les plus fortes valeurs de F.

Des défauts aussi importants ne se rencontrent évidemment pas. En revanche, sous l'effet de la compression des rails, les défauts existants peuvent s'accentuer et entraîner au passage des essieux des efforts transversaux plus importants qui, à leur tour, aggravent le défaut.

Des études précises ont été faites et contrôlées expérimentalement. Elles ont montré que dans tous les cas la sécurité est très largement assurée :

— même pour une voie partiellement déconsolidée par une opération d'entretien lorsque la température ne dépasse pas de plus d'une trentaine de degrés la température de contrainte nulle dite de réglage ;

— pour une voie stabilisée, c'est-à-dire dont le ballast est bien compacté, pour les températures les plus élevées.

De ces deux remarques découlent les précautions prises pour effectuer les travaux d'entretien des voies en *LRS*, (V. § 5).

La marge de sécurité est telle, lorsque la voie est en alignement droit, que l'on conserve encore une marge acceptable lorsque la voie est en courbe, à condition bien entendu de ne pas descendre au-dessous de certaines valeurs limites de rayon de courbure R. En simplifiant, on peut considérer qu'augmenter la composante radiale $\frac{F}{R}$ équivaut à réduire d'autant la résistance τ exercée par le ballast ; par suite, la flèche critique devient :

$$f = 13{,}8\,\frac{EI_t\left(\tau - \frac{F}{R}\right)}{(F - K)^2}$$

Les rayons limites admis par la S.N.C.F. sont les suivants :

— pour 1 722 traverses en bois par kilomètre :

Types de rails	R_{min}
46 kg	450 m
50 kg	550 m
60 kg	800 m

— pour 1 722 traverses en béton par kilomètre, R_{min} = 300 m quel que soit le rail.

Pour les voies sur traverses en bois, les conditions sont plus sévères quand le poids du rail augmente, car le rapport $\frac{I_t}{S^2}$ va en diminuant légèrement (les profils ne peuvent être homothétiques pour diverses raisons).

7. LA RÉSISTANCE TRANSVERSALE DE LA VOIE CHARGÉE

Le problème de la résistance de la voie aux efforts transversaux exercés par les essieux chargés est encore bien plus complexe. Il faut prendre en compte simultanément la distribution des réactions verticales, des réactions horizontales et des couples d'encastrement. Les valeurs limites de ces deux derniers varient en chaque point avec la réaction verticale en ce point.

Ce problème a été étudié théoriquement sur ordinateur, et expérimentalement au moyen d'un wagon spécial permettant d'exercer sur un essieu des efforts verticaux et transversaux connus. Les études théoriques aboutissent à des formules compliquées qu'il a fallu traduire de façon beaucoup plus simple pour les besoins de la pratique. Les résultats pratiques sont d'ailleurs faciles à présenter.

Soit P la charge d'un essieu et H l'effort transversal qu'il exerce sur la voie. La valeur limite H_L admissible pour une voie déterminée est la valeur maximale de H qui, si elle est répétée par de nombreux passages de l'essieu, provoque des déformations résiduelles de la voie, qui ne vont pas en s'aggravant. Si H est inférieur ou égal à H_L, ces déformations finissent par se stabiliser. Au contraire si H est supérieur à H_L on a des déformations résiduelles sans cesse croissantes.

H_L varie à peu près linéairement avec P, augmente beaucoup avec la compacité du ballast, varie peu avec le profil du rail et diminue légèrement quand les rails sont en compression (mais dans le cas de forte compression, on l'a vu, le ballast est toujours compacté et les travaux d'entretien sont interdits).

Comme les trains doivent pouvoir franchir les chantiers d'entretien où la compacité du ballast est diminuée on adopte comme valeur limite de H la valeur la plus faible dans les cas les plus défavorables et avec une marge de sécurité suffisante déterminée en tenant compte de la dispersion possible. La formule simple adoptée est :

$$H_L = 0{,}85\left(10 + \frac{P}{3}\right)$$

H et P sont exprimés en kilonewtons.

Ainsi, un essieu de 21 t (ou 210 kN) ne doit pas exercer, des efforts transversaux H supérieurs à 68 kN quelle que soit sa vitesse, en courbe comme en alignement.

Lors des essais du matériel roulant, les efforts exercés par les essieux sont contrôlés. Grâce à ces contrôles, les progrès qui ont été réalisés en matière de stabilité de marche des véhicules ferroviaires sont tels que l'on a la certitude de pouvoir autoriser en service commercial des circulations à plus de 250 km/h, et dans peu de temps à 300 km/h très vraisemblablement, tout en respectant les marges de sécurité fixées. Il est évident que la voie sur dalle en béton lèverait cette contrainte mais on a dit que dans les conditions de trafic actuelles cette solution ne pouvait être considérée comme économiquement acceptable.

On conçoit que le respect de la condition formulée ci-dessus peut conduire à fixer des limites de vitesse en courbe par suite des efforts dus à l'inertie centrifuge. En réalité on va voir que les conditions de confort sont beaucoup plus sévères que les conditions de sécurité.

8. LE TRACÉ DE LA VOIE EN COURBE

Mis à part les efforts résultant de l'inscription des véhicules en courbe, aucun effort dû à l'inertie centrifuge ne serait exercé sur la voie et les voyageurs ne ressentiraient pas son effet si la pente transversale α de la voie était égale à l'inclinaison i sur la verticale de la résultante de l'accélération g de la pesanteur et de l'accélération centrifuge $\frac{V^2}{R}$. L'angle i étant petit, on peut écrire $i = \frac{V^2}{Rg}$ et le dévers de la voie, ou surhaussement du rail extérieur, doit être égal à :

$$d_{th} = \frac{V^2 e}{Rg} \approx 11{,}8\,\frac{V^2}{R} \qquad (\text{car } \alpha \approx \frac{d_{th}}{e})$$

Dans cette formule :

e est l'écartement de la voie ($e = 1\,500$ mm) ;

V est la vitesse exprimée en kilomètres par heure ;

R est le rayon de la courbe en mètres ;

d_{th} est le dévers théorique d'équilibre en millimètres (fig. I-24).

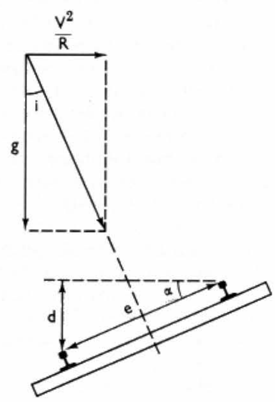


Fig. I-24

En raison du risque de renversement des wagons à centre de gravité élevé sous l'effet de vents violents, on ne peut aller au-delà de 180 mm de dévers et l'on recommande de ne pas dépasser 160 mm pour le confort des voyageurs, en cas d'arrêt d'un train en courbe. Ces valeurs constituent aussi des limites. Pour cette raison de confort également, on ne peut accepter en vitesse des valeurs d'insuffisance de dévers supérieures à 160 mm.

L'accélération résiduelle dite « non compensée » ressentie par le voyageur, lorsque le dévers de la voie est d, est, à la vitesse V :

$$\gamma = \frac{V^2}{R} - g\,\frac{d}{e}$$

$$\gamma = \left(11{,}8\,\frac{V^2}{R} - d\right)\frac{g}{1\,500} \quad \begin{cases} V \text{ en kilomètres par heure} \\ R \text{ en mètres} \\ d \text{ en millimètres} \end{cases}$$

$I = 11{,}8\,\frac{V^2}{R} - d$ est l'insuffisance de dévers en millimètres

$$\gamma = \frac{I}{1500}\,g$$

g : accélération de la pesanteur.

En réalité, sous l'effet de l'inertie centrifuge, le véhicule se couche vers l'extérieur de la courbe du fait de la souplesse des ressorts de suspension ; l'accélération réellement ressentie par le voyageur est :

$$\gamma = \frac{I}{1500}\,(1 + s)\,g$$

s : coefficient de souplesse du véhicule.

Dans les voitures modernes qui ont des suspensions souples, afin de rendre moins sensible la caisse du véhicule aux défauts de la voie (V. ci-après), ce coefficient peut atteindre la valeur 0,4.

En fonction du confort les valeurs de γ sont les suivantes :

— bon confort : $\gamma = 0{,}12\ g$ d'où $I = 130$ mm
— acceptable : $\gamma = 0{,}14\ g$ d'où $I = 150$ mm
— exceptionnellement acceptable : $\gamma = 0{,}15\ g$ d'où $I = 160$ mm

(« exceptionnellement acceptable » signifie que pour éviter un ralentissement dans une courbe on peut parfois admettre cette valeur).

Les rayons minimaux s'en déduisent par la formule :

$$R = \frac{11{,}8\,V^2}{I + d}$$

Des exemples de rayons minimaux en fonction de la vitesse sont donnés dans le tableau ci-après.

Pour les lignes nouvelles en projet : Paris-Lyon, Paris-Bruxelles avec une antenne vers le tunnel sous la Manche, où la vitesse maximale prévue est de 300 km/h, on a fixé à 4 000 m la valeur normale du rayon minimal et exceptionnellement 3 200 m dans les zones difficiles (traversée du Morvan, par exemple). Sur les lignes existantes, de nombreuses zones peuvent être parcourues à 160 km/h, beaucoup moins à 200 km/h. Seule la ligne Paris-Bordeaux présente de nombreuses zones susceptibles d'être parcourues à 200 km/h, particularité que l'on est en train de mettre à profit.

Pour éviter que les trains de marchandises lourds, les moins rapides, franchissent des courbes avec dévers excessif, susceptible d'entraîner des surcharges trop importantes pour les rails de la file intérieure de la courbe, on limite la valeur de cet excès de dévers à 125 mm pour la vitesse de 70 km/h et même à beaucoup moins lorsque ce trafic est important : 70 mm. Il en résulte que le dévers ne doit pas dépasser la valeur de :

$$70 + \frac{11{,}8 \times 70^2}{R}$$

sur les lignes supportant un important trafic de marchandises. Sur ces lignes, le rayon minimal permettant la circulation des trains de voyageurs à 160 km/h est tel que :

$$\frac{11{,}8 \times 70^2}{R} + 70 = \frac{11{,}8 \times 160^2}{R} - 150$$

soit $R = 1\,120$ m, valeur supérieure à celle figurant dans le tableau ci-après.

Le raccord d'un alignement droit avec une courbe doit se faire par une variation progressive et régulière de la courbure et du dévers. On utilise généralement la parabole cubique qui répond à la condition de variation linéaire :

$$\frac{1}{\rho} = ks \approx kx$$

En effet, $\frac{1}{\rho} \approx y''$, d'où $y = \frac{kx^3}{6}$

Si L est la longueur du raccordement : $k = \frac{1}{RL}$ et $y = \frac{x^3}{6\,RL}$

d (millimètres)	I (millimètres)	$V = 160$ km/h	$V = 200$ km/h	$V = 250$ km/h	$V = 300$ km/h
160	130	$R = 1\,040$ m	$R = 1\,630$ m	$R = 3\,540$ m	$R = 3\,660$ m
160	150	980 m	1 530 m	2 350 m	3 430 m
180	150	920 m	1 430 m	2 240 m	3 200 m

La longueur du raccordement est déterminée de manière telle que la variation de dévers et la variation d'accélération non compensée soient suffisamment lentes pour ne pas nuire au confort. À la S.N.C.F. on a adopté les valeurs limites suivantes :

Variation de dévers : $\frac{dD}{dt}$: 50 mm/s, exceptionnellement 60 mm/s ;

Variation d'insuffisance de dévers : $\frac{dI}{dt}$: 75 mm/s, exceptionnellement 90 mm/s ;

$\frac{dD}{dx}$ (en millimètres par mètre) est égal à $\frac{180}{V}$, exceptionnellement à $\frac{216}{V}$.

$\frac{dI}{dx}$ (en millimètres par mètre) est égal à $\frac{270}{V}$, exceptionnellement à $\frac{324}{V}$.

Pour une valeur de dévers D et d'insuffisance I en pleine courbe, la longueur minimale des raccordements est égale à :

$$L_{\min} = \frac{DV}{180} \left(\text{exceptionnellement } \frac{DV}{216}\right)$$

$$L_{\min} = \frac{IV}{270} \left(\text{exceptionnellement } \frac{IV}{324}\right)$$

soit, pour les valeurs maximales $D = 160$ mm, $I = 150$ mm :

$$L > 0{,}89\ V \qquad (L \text{ en mètres})$$

$$L > 0{,}56\ V$$

À 200 km/h, la longueur minimale du raccordement sera de 178 m.

En outre pour éviter des discontinuités dans la variation d'accélération non compensée, on introduit à chaque extrémité du raccordement ce que l'on appelle des « doucines ». Si ces doucines s'étendent sur la moitié du raccordement, on a un raccordement dit « sinusoïdal » tel que :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{2R}\left(1 - \cos\frac{\pi x}{L}\right)$$

(ρ : rayon de courbure au point d'abscisse x du raccordement).

Toutes les conditions énumérées ci-dessus sont des conditions de confort et non de sécurité. En effet, la condition de sécurité vis-à-vis du risque de déformation de la voie s'exprime (V. § 7) par la formule :

$$H < 0{,}85\left(10 + \frac{P}{3}\right) \qquad (P \text{ et } H \text{ en kilonewtons}).$$

Une locomotive moderne à essieux de 21 t exerce sur la voie en alignement droit des efforts H_a ne dépassant pas 400 kN par suite des mouvements parasites. En courbe franchie avec une insuffisance de dévers I, il s'y ajoutera un effort supplémentaire quasi statique égal à : $\frac{PI}{1\,500}$ (I en millimètres). On pourrait donc admettre des valeurs de I telles que :

$$H_a + \frac{PI}{1\,500} < 0{,}85\left(10 + \frac{P}{3}\right)$$

$$\text{soit : } I < 0{,}85\left(\frac{1\,500}{P} + 500\right) - H_a\frac{1\,500}{P}$$

Avec $P = 210$ kN, $H_a = 40$ kN on trouve : $I < 200$ mm, soit 50 mm de plus que la valeur maximale de 150 mm fixée pour avoir un confort acceptable. Dans le cas de véhicules plus légers, on pourrait même accepter des valeurs d'insuffisance de dévers beaucoup plus grandes ; on a atteint 270 mm au cours d'essais. Cela explique l'étude entreprise pour mettre au point des voitures spéciales permettant de compenser artificiellement l'insuffisance de dévers par inclinaison de la caisse asservie à l'accélération transversale. De telles voitures permettraient d'augmenter sensiblement les vitesses sur les lignes existantes en assurant même un meilleur confort.

On voit que les possibilités offertes par la voie ferrée ordinaire ballastée ne sont pas encore épuisées.

9. LA QUALITÉ GÉOMÉTRIQUE DE LA VOIE ET LES PHÉNOMÈNES D'INTERACTION VÉHICULE-VOIE

Parmi les facteurs qui interviennent dans les phénomènes dynamiques, il en est un a priori très préoccupant : c'est celui de la qualité géométrique de la voie. Par les procédés modernes de nivellement et de dressage de la voie on atteint un degré de perfection qui ne semble guère susceptible d'être dépassé. Pour des vitesses très supérieures à celles pratiquées actuellement (200 km/h), si l'on ne pouvait s'accommoder de cette qualité, il faudrait sans aucun doute recourir à une autre technique : voie posée sur dalle en béton par exemple.

Pour étudier théoriquement l'influence de la qualité géométrique de la voie, la première chose à faire était de définir sous une forme utilisable, dans un calcul même approché, les défauts de la voie. Le désir des services d'entretien d'arriver à chiffrer la qualité d'une voie allait d'ailleurs dans le même sens.

À cet effet, on a enregistré sur bandes magnétiques les défauts de nivellement et de dressage relevés par les voitures Mauzin d'auscultation des voies. À partir de tels enregistrements, il est possible d'effectuer une analyse harmonique, c'est-à-dire de tracer un spectre qui met en évidence l'importance des diverses longueurs d'onde composantes.

Pour étudier les efforts qui découlent de ces défauts, il faut avoir les spectres des défauts « vrais » et non pas ceux déformés par la méthode de mesure : par exemple, en tracé il faut l'ordonnée y en fonction de l'abscisse x et non pas la flèche sous une certaine corde. Le spectre des défauts mesurés doit donc être corrigé de la fonction de transfert du système de mesure qui est connue, pour obtenir le spectre des défauts « vrais » (1).

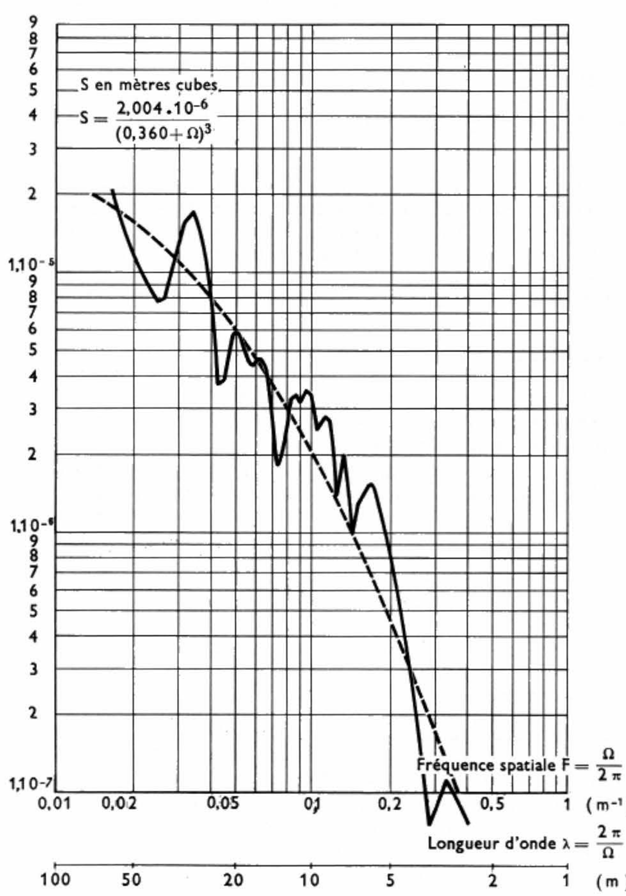


Fig. I-25 — Spectre de densité de puissance des défauts de voie « vrais » : nivellement longitudinal (Ω : pulsation spatiale)

(1) Pour plus de détails sur cette question, se reporter à l'article de MM. Gent et Janin dans le numéro de décembre 1969 de la R.G.C.F.

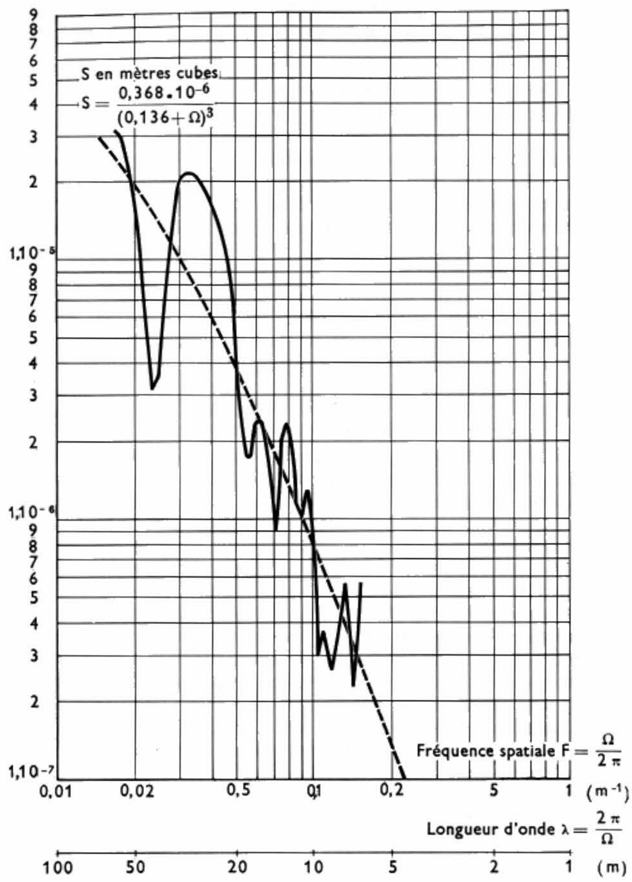


Fig. I-26 — Spectre de densité de puissance des défauts de voie « vrais » : tracé

À titre d'exemple on donne les spectres des défauts de nivellement longitudinal et de tracé d'une zone de voie de la ligne Les Aubrais-Vierzon, actuellement parcourue journellement à 200 km/h par les deux trains « Le Capitole ». Cette voie est en longs rails soudés de profil 50 kg U 36, posés sur traverses en bois et datant de 1954 (V. fig. I-25 et I-26).

Ces courbes représentent les spectres de fond continu, auxquels s'ajoutent en réalité des raies à 18 m de longueur d'onde, qui correspondent aux soudures, et aussi à 9 m environ, et que l'on voit d'ailleurs très bien sur les enregistrements graphiques classiques.

Au travers de ces spectres on peut tracer une ligne moyenne que l'on a cherché à mettre sous forme mathématique. Pour tous les spectres qui ont été tracés de la même façon, on a un ajustement correct par une expression de la forme :

$$S(\Omega) = \frac{A}{(B + \Omega)^3}$$

où Ω est la pulsation spatiale ($\Omega = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ étant la longueur d'onde).

On voit que les amplitudes des défauts croissent avec la longueur d'onde, mais d'autant moins vite que la longueur d'onde est plus grande.

À partir de cela, la théorie des vibrations aléatoires appliquée aux mouvements des masses non suspendues et suspendues des véhicules permet alors théoriquement de calculer les mouvements des accélérations ou les efforts, et pratiquement de saisir leur évolution.

9.1. Mouvements verticaux. — L'étude de ces mouvements est intéressante à deux points de vue pour évaluer, d'une part, les surcharges dynamiques verticales sur les rails, d'autre part, les accélérations verticales de caisse ou de bogies.

9.1.1. Oscillations des masses non suspendues des véhicules. — La fréquence propre d'oscillation verticale d'une roue de masse m sur une voie ayant une rigidité verticale h est :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{h}{m}}$$

On a vu que l'élasticité verticale d'une voie est voisine de $\frac{1}{10}$ à $\frac{1}{4}$ mm par tonne, soit $h = 40$ à 100 kN/mm.

Pour un essieu de véhicule remorqué $m \approx 600$ kg.

Pour un essieu de locomotive $m \approx 1\,600$ kg.

On voit ainsi que f peut varier de 25 à 65 Hz.

Les longueurs d'ondes des défauts de voie qui provoquent la résonance varient de : 0,40 à 1,10 m à 100 km/h, 0,80 à 2,20 m à 200 km/h, 1,20 à 3,30 m à 300 km/h.

Ce sont des défauts de courte longueur d'onde qui ne sont pas dus à des irrégularités d'assise de la voie sur le ballast mais à des irrégularités de la surface de roulement du rail lui-même. Elles ont des amplitudes voisines de 0,1 mm. Le rail peut présenter une usure ondulatoire régulière, auquel cas il y aura effectivement résonance à une certaine vitesse ; le plus souvent il s'agit de défauts aléatoires dont le spectre dans cette bande de longueurs d'ondes est de la forme : $S(\Omega) = \frac{A}{\Omega^3}$. Alors la théorie montre que les surcharges dynamiques Δq dues aux oscillations des masses non suspendues sont données par la formule :

$$\sigma_{\Delta q} = k\,\frac{\sigma_D V}{\gamma}\sqrt{hm}$$

$\sigma_{\Delta q}$: écart type de Δq.

σ_D : écart type des défauts de la voie dans la bande de longueurs d'ondes 0 — 3 m.

Ordre de grandeur de $\sigma_{\Delta q}$:
- 400 à 800 daN à 100 km/h pour une roue de wagon
- 12 à 25 kN à 200 km/h pour une roue de locomotive.

Les valeurs maximales sont environ le double.

Quand V augmente on voit l'intérêt de diminuer les masses non suspendues, d'augmenter l'élasticité de la voie, de recharger rapidement les avaries de surface du rail, d'utiliser un rail lourd et de nuance dure afin de limiter l'augmentation des ondulations avec le trafic. Il faut aussi des roues bien équilibrées.

9.1.2. Oscillations des masses suspendues des véhicules. — Le calcul, même avec des hypothèses simplificatrices, est plus difficile que dans le cas précédent et ne peut être effectué que sur ordinateur. On peut cependant saisir l'influence des divers facteurs sans faire le calcul complet et les conclusions essentielles (d'ailleurs confirmées par les calculs numériques sur ordinateur) que l'on a tirées sont les suivantes :

1° *Les accélérations verticales des masses suspendues* dues aux défauts géométriques de la voie, représentés par leur spectre de fond continu, *croissent avec la vitesse, mais moins vite qu'elle.*

2° Cette croissance est d'autant moins rapide que la fréquence propre d'oscillation verticale des masses suspendues est plus faible. *L'influence de cette fréquence propre est considérable.* C'est certainement le facteur sur lequel on peut agir avec le plus d'efficacité. Une réduction relativement modeste de la fréquence propre peut annuler facilement l'effet de l'augmentation de vitesse.

3° L'effet d'une amélioration de la qualité géométrique de la voie va en s'atténuant au-delà d'une certaine vitesse et cette vitesse est d'autant plus basse que la fréquence propre est elle-même plus basse. *Les travaux d'entretien deviennent alors de moins en moins efficaces.*

Remarque : Il en résulte que ce serait une très mauvaise solution que de vouloir à grands frais réaliser un standing des voies d'autant plus élevé que la vitesse est elle-même plus grande, alors que l'on peut obtenir un résultat bien supérieur en réduisant dans une proportion modeste la fréquence propre d'oscillation verticale des masses suspendues.

Lors des essais effectués jusqu'à 250 km/h, il a été effectivement constaté que ces accélérations verticales de caisse croissent modérément avec la vitesse et que le confort obtenu à de telles vitesses dans des voitures modernes, dont la fréquence propre des oscillations verticales de caisse est voisine de 1 Hz, est nettement supérieur à celui ressenti à des vitesses beaucoup plus basses dans des voitures anciennes, dont la fréquence propre est plus élevée sur des voies de même niveau de qualité.

Quant à l'influence des raies des spectres, c'est-à-dire des longueurs d'ondes de 9 m et 18 m dont on a parlé, avec une fréquence propre de 1 Hz, la résonance se produit à 32 et 65 km/h. Au-delà de cette dernière vitesse, on est en régime supercritique et effectivement on constate que les joints ou les soudures sont d'autant moins ressentis que la vitesse est plus élevée.

Il résulte de tout cela que l'on peut être certain de pouvoir obtenir un excellent confort vertical même à 300 km/h et, qu'en ce qui concerne les efforts exercés sur la voie, la part due aux oscillations verticales de caisse restera faible.

Elle sera même plus faible à 300 km/h pour les futurs turbotrains que pour les locomotives circulant à 200 km/h, la masse de la caisse étant plus faible et les accélérations moins grandes.

Il reste toutefois le problème des masses semi-suspendues dont la fréquence propre est plus grande que celle de la caisse. C'est essentiellement le galop du bogie qui est à craindre ; sa fréquence propre est comprise entre 5 et 10 Hz suivant qu'il s'agit d'un bogie moteur lourd ou d'un bogie porteur plus léger.

L'augmentation avec la vitesse des accélérations de ces masses dues au spectre de fond des défauts de voie, sans être proportionnelle à la vitesse, sera néanmoins beaucoup plus rapide que celle des masses suspendues. En revanche, lorsque l'on se rapproche de la vitesse de résonance correspondant aux raies du spectre, la croissance est beaucoup plus rapide que la vitesse (elle varie sensiblement en fonction du carré de la vitesse).

À noter qu'avec une fréquence propre de 5 Hz, la résonance se produit à 160 km/h pour la raie de 9 m de longueur d'onde et à 320 km/h pour la raie de 18 m de longueur d'onde.

Vis-à-vis des oscillations des masses semi-suspendues, les rails soudés présentent un très gros intérêt car les défauts correspondant aux soudures ont une amplitude très faible, de sorte que, même en cas de résonance, les surcharges dynamiques dues aux oscillations des masses semi-suspendues restent modérées. De plus, il est facile de recharger en temps voulu les soudures creuses.

Il n'en reste pas moins qu'il faut chercher à réduire ces masses, les concentrer pour réduire le rayon de giration dans le cas de bogies moteurs, augmenter dans la mesure du possible l'élasticité de la suspension primaire et lui donner un certain amortissement. Si, en ce qui concerne les accélérations de caisse, il est préférable d'amortir la suspension secondaire, du point de vue des efforts exercés sur la voie, un certain amortissement à la suspension primaire peut être aussi nécessaire.

Il ne s'agit pas là de problèmes difficiles. Ils ont été parfaitement maîtrisés sur le turbotrain expérimental TGV 001 qui a circulé à 318 km/h en exerçant sur la voie des efforts moins importants que les locomotives actuelles à 200 km/h seulement.

9.2. Mouvements transversaux. — Le problème est encore plus difficile.

Si les roues n'avaient aucun jeu dans la voie, les conclusions de l'étude faite pour les oscillations verticales seraient transposables aux oscillations transversales. Il ne peut en être ainsi, de sorte que l'on a affaire à un mouvement plus complexe constitué par le lacet de bogie, certes influencé par les défauts de tracé de la voie, mais qui a une fréquence sensiblement proportionnelle à la vitesse (sa longueur d'onde spatiale varie peu avec celle-ci). C'est le lacet de bogie qui constitue l'excitation des mouvements de lacet, de ballant et de roulis de la caisse.

Les principes désormais adoptés pour les véhicules modernes consistent à donner à la fréquence propre de lacet de caisse et aux fréquences couplées de ballant-roulis une valeur suffisamment basse afin qu'au-dessus d'une certaine vitesse critique (assez faible), la fréquence du lacet de bogie s'éloigne de ces fréquences propres de caisse (régime supercritique). Sous réserve que les amplitudes du lacet de bogie n'augmentent pas exagérément, il en résulte que les accélérations transversales de caisse diminuent quand la vitesse augmente.

Le seul problème est donc celui de la stabilité du bogie. Pour que le bogie reste stable, c'est-à-dire pour que ses mouvements oscillatoires restent amortis, il faut que sa vitesse critique propre soit suffisamment élevée par rapport à celles pratiquées. La vitesse critique d'un bogie augmente quand sa masse et son rayon de giration diminuent. A une vitesse déterminée, les efforts transversaux exercés sur la voie diminuent bien entendu également avec ces deux caractéristiques.

D'où l'intérêt ici encore d'avoir transversalement des masses non suspendues de bogie aussi faibles que possible. Des essais, au cours desquels on a fait varier la masse non suspendue, ont confirmé la très forte influence de ce facteur. La vitesse critique du bogie et sa longueur d'onde spatiale de lacet varient dans le même sens, et il en est de même des efforts transversaux exercés sur la voie. D'où l'intérêt d'avoir une longueur d'onde de lacet aussi grande que possible mais compatible avec le régime hypercritique des oscillations de caisse.

De plus, un couple de rotation augmente la vitesse critique. On y recourt en général pour les bogies moteurs dont la masse réduite est nécessairement plus grande que celle des bogies de voitures, mais on limite ce couple dans la mesure du possible pour éviter des efforts d'inscription excessifs en courbe de faible rayon.

Quelle est l'influence des irrégularités du tracé de la voie ? Il est évident que le lacet de bogie est surtout influencé par les défauts dont la longueur d'onde coïncide précisément avec la longueur d'onde propre du lacet de bogie et que cette influence est d'autant plus grande que la vitesse se rapproche de la vitesse critique du bogie. C'est la raison pour laquelle les diagrammes d'enregistrement des défauts de tracé de la voie doivent être traités de manière à mettre en relief les longueurs d'onde correspondant au lacet (de 20 à 40 m). Sur deux diagrammes non traités de cette façon, deux voies peuvent avoir apparemment la même qualité, alors que l'une est en fait plus défavorable que l'autre. Mais ici encore il n'est pas douteux qu'il est plus facile d'agir sur le véhicule pour réduire son lacet de bogie que d'améliorer la qualité de la voie. On dispose de plusieurs paramètres pour cela.

Pour illustrer tout ce qui vient d'être dit ci-dessus, on a représenté par des graphiques en chandelles les efforts dynamiques verticaux exercés par les roues de divers véhicules : wagons entre 70 et 120 km/h ; locomotives et voitures de voyageurs à 160 et 200 km/h ; turbotrain TGV 001 à 300 km/h (V. fig. I-27).

9.3. Surveillance de la géométrie de la voie et cotation de sa qualité. — L'utilisation exhaustive des possibilités de la voie ferrée impose en contrepartie une

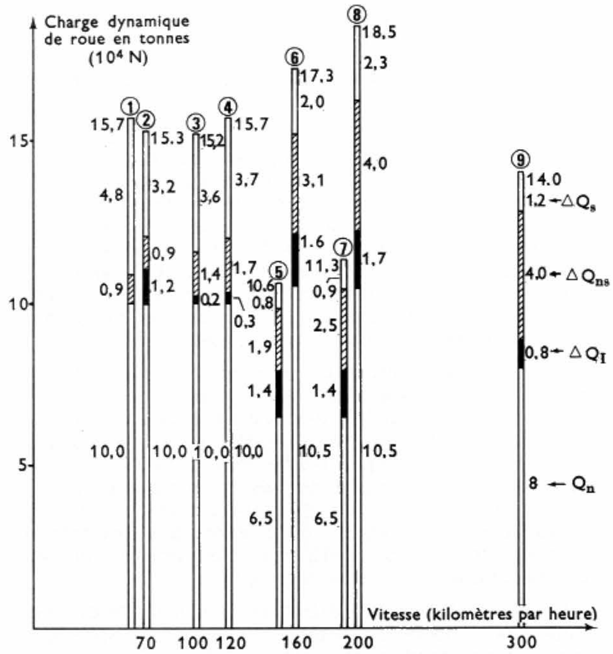


Fig. I-27 — Charges dynamiques de roue maximales

Q_n : charge nominale de roue

ΔQ_I : surcharge quasi statique due à un excès ou une insuffisance de dévers

ΔQ_{ns} : surcharge due aux oscillations des masses non suspendues

ΔQ_s : surcharge due aux oscillations des masses suspendues

1. Wagon ancien ; P = 20 t en alignement droit ; V = 70 km/h
2. Wagon moderne ; P = 20 t en courbe ; R = 1 200 m, D = 115 mm ; V = 70 km/h, E = 67 mm
3. Wagon moderne ; P = 20 t en courbe ; R = 1 200 m, D = 115 mm ; V = 100 km/h, E = 17 mm
4. Wagon moderne ; P = 20 t en courbe ; R = 1 200 m, D = 115 mm ; V = 120 km/h, I = 26 mm
5. Voiture moderne ; P = 13 t en courbe ; R = 1 200 m, D = 115 mm ; V = 160 km/h, I = 137 mm
6. Locomotive BB 9200 ; P = 21 t en courbe ; R = 1 200 m, D = 115 mm ; V = 160 km/h, I = 137 mm
7. Voiture moderne ; P = 13 t en courbe ; R = 2 000 m, D = 100 mm ; V = 200 km/h ; I = 136 mm
8. Locomotive BB 9200 ; P = 21 t en courbe ; R = 2 000 m, D = 100 mm ; V = 200 km/h, I = 136 mm
9. Futur turbotrain ; P = 16 t en courbe ; R = 4 000 m, D = 160 mm ; V = 300 km/h, I = 100 mm

surveillance extrêmement serrée de ses caractéristiques géométriques et une organisation précise des opérations de maintenance.

Depuis vingt ans environ la S.N.C.F. dispose pour cela d'un excellent outil de travail : les voitures d'auscultation de la voie mises au point par M. Mauzin. Sur la géométrie de la voie ces voitures donnent des indications très précises qui permettent aux agents d'entretien de localiser et d'identifier les défauts. Ces voitures passent en général deux fois par an, au printemps et à l'automne, sur l'ensemble des voies ; pour les lignes les plus importantes on prévoit une tournée intermédiaire dans le milieu de l'été.

Les graphiques (fig. I-28) comportent sept pistes qui donnent à l'échelle de 20 cm au kilomètre les indications suivantes :

Pistes 1 et 2 : Nivellement longitudinal des deux files de rails, par l'écart pris par rapport à la moyenne sur 12 m.
Piste 3 : Nivellement transversal, par différence des deux premiers signaux.
Piste 4 : Gauche sur base de 2,75 m.
Pistes 5 et 6 : Flèche sur base de 10 m des deux files de rails.
Piste 7 : Écartement.

Ces graphiques, qui se prêtent admirablement à l'étude des défauts localisés dont ils donnent une valeur chiffrée précise, sont et resteront indispensables au chef de district. Toutefois, il est bien certain qu'ils ne permettent d'apprécier que de façon qualitative l'état général de la voie et de son évolution.

Des signaux dont on disposait, il semblait donc intéressant de tirer des informations plus élaborées et plus condensées que celles qui résultaient de la simple lecture des graphiques. Il était pour cela nécessaire de transformer les déplacements des styles en signaux électriques et, du moins en première étape, de les enregistrer sur bande magnétique pour pouvoir les traiter sur calculatrice. Une deuxième étape a consisté à supprimer les transmissions mécaniques, à fixer directement des capteurs de déplacements électriques sur les palpeurs et à réaliser, par un montage analogique, les diverses combinaisons de signaux jusqu'alors réalisées de façon mécanique.

Le traitement des signaux a été abordé simultanément en calcul digital et en calcul analogique. Le but de ce traitement est, d'une part de donner une appréciation globale de la qualité géométrique de la voie, d'autre part de rechercher dans le signal des éléments permettant de discerner la dérive irréversible, caractéristique du vieillissement inéluctable de la voie, et la dérive réversible que l'on peut corriger par la maintenance.

Les paramètres choisis sont de trois ordres :

— Un paramètre d'amplitude, qui est l'écart moyen des défauts sur une longueur de 300 m (qui peut d'ailleurs être modifiée suivant le niveau de commandement à qui s'adresse le traitement). Dans certains cas, ce paramètre est complété par l'indication des dépassements d'un seuil fixé à l'avance, variable avec le standing que l'on désire maintenir.

— Un paramètre de fréquence (ou de longueur d'onde), caractéristique de la distribution des longueurs d'onde dans le spectre.

— Un paramètre de forme du spectre, caractéristique de la décroissance de celui-ci avec la longueur d'onde.

Un exemple de dépouillement par calcul analogique est donné figure I-29. On y distingue dix pistes :

- *Six pistes analogiques donnant :*

— Les paramètres d'amplitude pour le nivellement longitudinal, le nivellement transversal, le dressage, l'écartement.

— Le paramètre de fréquence pour le dressage qui caractérise l'importance relative des grandes et des petites longueurs d'onde.

— Le tracé moyen de la voie par la courbure, les défauts étant filtrés.

- *Quatre pistes digitales :*

— Trois d'entre elles donnent une indication chaque fois qu'un seuil fixé à l'avance est dépassé. Pour les lignes où la vitesse est grande ($\geqslant$ 140 km/h), on a fixé : 7 mm en nivellement longitudinal ; 5 mm en nivellement transversal ; 5 mm en dressage (sur corde de 10 m).

Ces valeurs peuvent être modifiées et adaptées au standing de la ligne.

— La quatrième piste permet le pointage des kilomètres.

L'échelle d'abscisse est d'environ 1 cm pour 1 km. Elle peut être modifiée également suivant l'échelon de commandement intéressé.

Le paramètre de forme du spectre n'est pas actuellement obtenu par calcul analogique, mais par calcul digital.

Ces graphiques donnent ainsi une vue d'ensemble condensée et très facile à saisir de l'état de la voie.

10. CONCLUSION

Dans les divers paragraphes ci-dessus, on a essayé de faire le point des connaissances acquises et des solutions adoptées en matière de voie ferrée.

Mais dans cet exposé nécessairement sommaire, on n'a pas ou peu abordé les problèmes d'entretien qui, à eux seuls, nécessiteraient un développement de même importance : les progrès ont été en effet considérables. Les méthodes modernes d'entretien de la voie ferrée, toujours davantage mécanisées, ont permis de réduire le coût de cet entretien dans de fortes proportions, malgré un trafic croissant, tout en assurant une qualité aux voies ferrées françaises que chacun s'accorde à reconnaître comme une des meilleures, sinon la meilleure, dans le monde.

Il n'a pas été non plus possible de parler des appareils de voie. Là aussi la S.N.C.F. est à l'avant-garde : le premier appareil franchissable en déviation à 160 km/h a été mis en service en octobre 1970 sur la ligne Paris-Lyon.

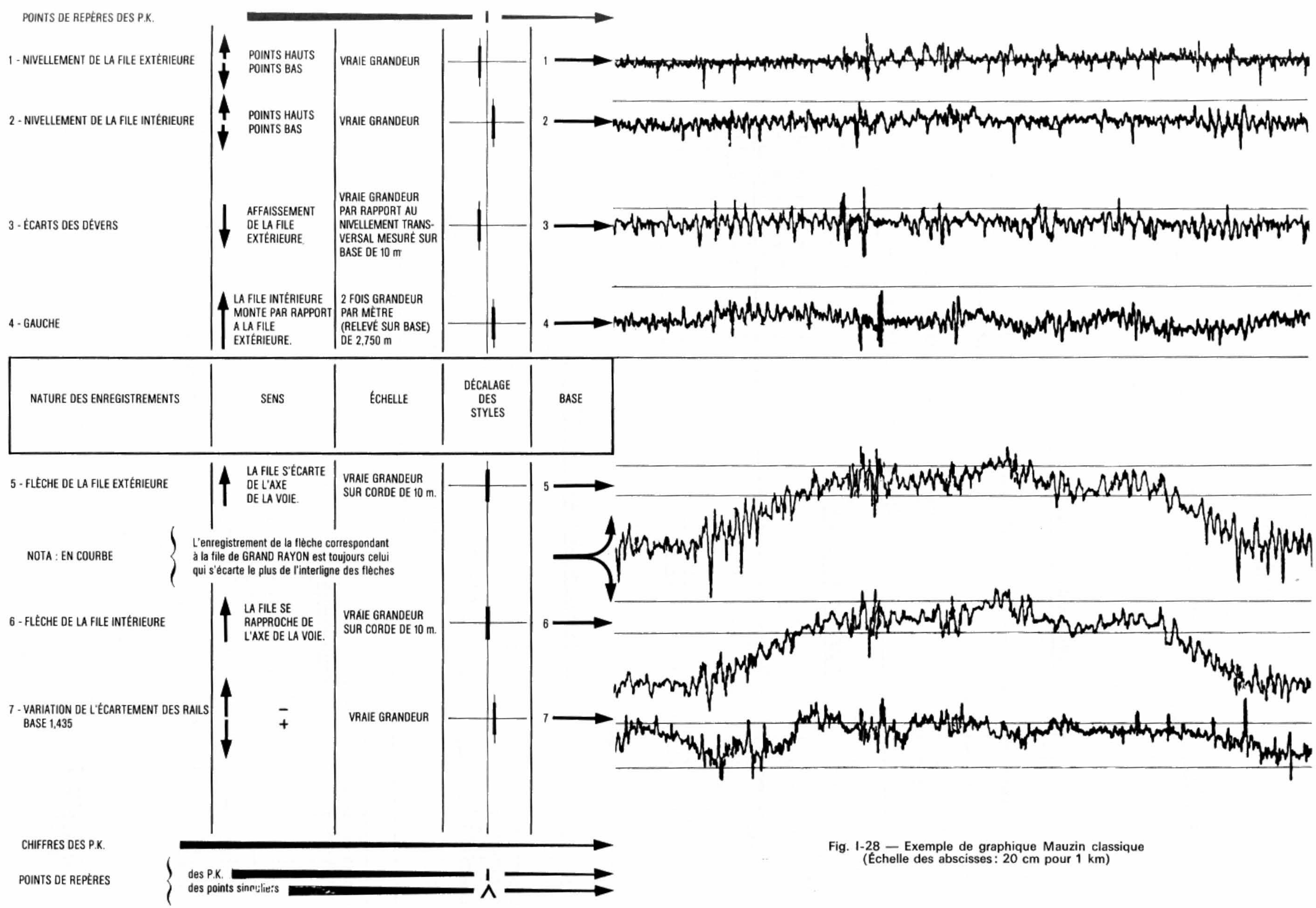


Fig. I-28 — Exemple de graphique Mauzin classique
(Échelle des abscisses : 20 cm pour 1 km)

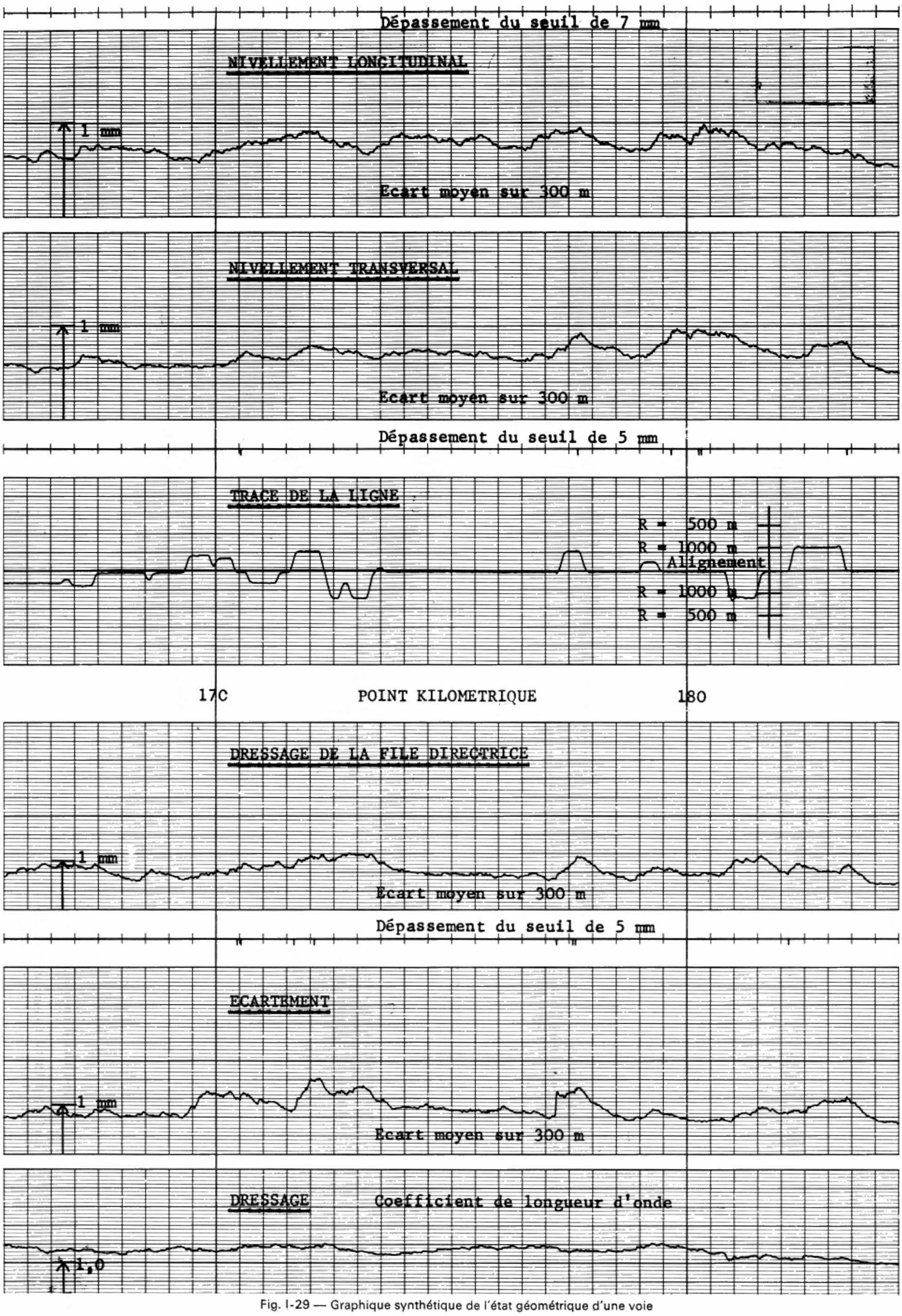


Fig. I-29 — Graphique synthétique de l'état géométrique d'une voie

CHAPITRE II
L'ADHÉRENCE ROUE-RAIL

La traction ferroviaire, tout comme la traction routière, est asservie au fait que toute force n'existe que si elle possède un point d'application. En l'occurrence, le point d'application est au contact de la roue et du rail. L'amplitude de l'effort de traction que l'on peut mettre en œuvre dépendant du coefficient d'adhérence existant au contact en question, l'adhérence de la roue sur le rail constitue un sujet d'intérêt d'autant plus vital, tant pour les constructeurs de locomotive que pour les Chemins de Fer, que les essieux moteurs des locomotives peuvent exercer un couple supérieur au couple résistant permis par ladite adhérence.

La forme de la surface du contact roue sur rail, tout comme celle du contact pneu sur route, est sensiblement, une ellipse mais, à charge égale, l'aire de la surface pneu sur route est beaucoup plus grande que celle du contact roue sur rail, les modules d'élasticité des matériaux en présence étant très différents. En fait, seules quelques aspérités interfaciales sont en contact et les pressions créées en ces surfaces unitaires sont égales à la limite élastique des matériaux : il s'ensuit que les rapports entre la surface apparente et la surface réelle des contacts en question, fonction des limites élastiques, sont différents. Les caractéristiques du contact roue sur rail motivent que les valeurs de la résistance au roulement pur et du coefficient d'adhérence soient en traction ferroviaire très inférieures à celles du contact pneu sur route.

Le déplacement d'un véhicule sur rail requiert donc peu d'énergie. Pour fixer les idées, les valeurs approximatives de résistance au roulement sont de :

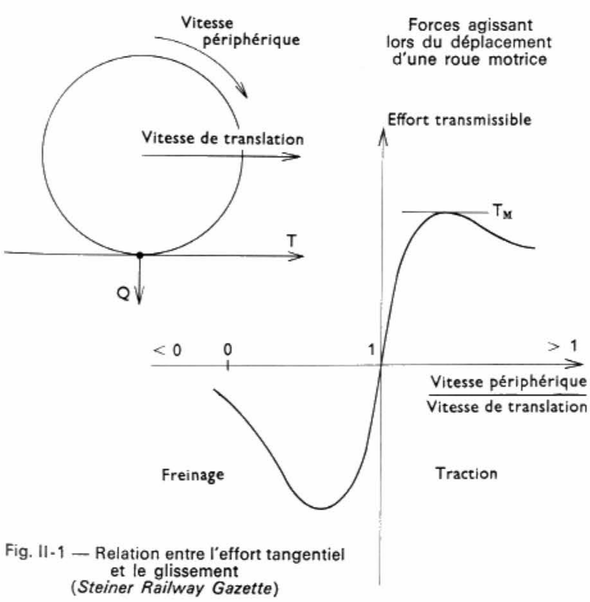


Fig. II-1 — Relation entre l'effort tangentiel et le glissement (*Steiner Railway Gazette*)

1,5 daN par tonne dans le cas roue acier sur rail acier ;
15 daN par tonne dans le cas pneu tourisme sur route ;
30 daN par tonne dans le cas pneu poids lourds sur route.

En ne considérant toujours que la seule résistance au roulement pur pour déplacer 1 t à 100 km/h, il faut développer une puissance de 0,4 kW pour un véhicule sur rail ; 4 kW pour une automobile ; 8 kW pour un camion gros porteur.

Mais en traction ferroviaire la difficulté est de démarrer convenablement le convoi, le coefficient d'adhérence ferroviaire étant le tiers du coefficient routier.

1. LES RELATIONS FONDAMENTALES DE LA TRACTION

Le démarrage d'une rame de wagons de masse totale Q_R par une locomotive de masse Q_L, dont tous les essieux sont moteurs, impose de satisfaire l'inégalité suivante :

$$(Q_R + Q_L)\ (r_0 + x_0) \leqslant a_0 . Q_L$$

soit :

$$(Q_R + Q_L) \leqslant \frac{a_0}{r_0 + x_0} Q_L$$

dans laquelle :
r_0 est la résistance au roulement exprimée en décanewtons par tonne,
x_0 est la rampe en millimètres par mètre,
a_0 est le coefficient d'adhérence à la vitesse nulle, dont la valeur varie avec les conditions locales à l'instant considéré.

La circulation de ce train à la vitesse V (en kilomètres par heure) sur une rampe de $x°/_{oo}$ requerra une puissance P (en kilowatts) à la jante telle que :

$$P = \frac{(Q_R + Q_L)\ (\mathcal{R} + x)\ V}{367}$$

$\mathcal{R}$ étant la somme de la résistance au roulement pur r (supérieur à r_0) et de la résistance aérodynamique ;
x étant la valeur de la rampe majorée, le cas échéant, pour tenir compte des résistances supplémentaires provoquées par les sinuosités de la voie.

2. ANALYSE DE L'ADHÉRENCE

L'analyse du phénomène « adhérence » est très complexe et encore actuellement non parachevée. Nous n'en donnons donc qu'un aperçu schématisé.

Soulignons tout d'abord que pour qu'une roue motrice déterminée, roulant sur un rail donné avec une certaine charge verticale, puisse produire un effort de traction, il faut que la vitesse périphérique de la roue soit légèrement supérieure à la vitesse de translation du centre de cette roue. Des glissements, très faibles mais réels, se produisent donc dans les structures de l'interface roue-rail (fig. II-1).

2.1. Contact de deux surfaces planes. — Considérons un parallélépipède rectangle d'aire S reposant sur une surface plane et appelons Q la charge uniformément

répartie. La pression apparente d'empreinte est donc $\frac{Q}{S} = p$. En réalité, dans le domaine microgéométrique (dont l'ordre de grandeur s'étend de 10^{-1} à 10^{-4} millimètre), les surfaces des deux corps :

— subissent aux points de contact des déformations perpendiculaires aux surfaces, du type élastique ou non, allant jusqu'à obtenir l'établissement de la surface réelle de contact nécessaire à l'appui ;

— connaissent une pénétration mutuelle des rugosités restant libres après le tassement initial ci-dessus, les surfaces des aspérités s'établissant dans un volume d'interpénétration.

Appliquons à ce parallélépipède un effort tangentiel T progressivement croissant.

1° Dans une première phase, il se produit un déplacement limité, de très faible amplitude, dû aux déformations superficielles ; cette phase se prolonge tant que subsiste l'interpénétration des aspérités. On se trouve en face d'un pseudo-glissement qui, dans le cas d'une roue motrice, est égal à : $\frac{dx + R\,d\alpha}{dx}$, dx étant le déplacement linéaire, R le rayon de la roue et $d\alpha$ l'angle définissant la rotation de la roue durant le temps où s'accomplit dx. Ainsi pour un déplacement linéaire de 10 000 m d'une roue chargée à 10 t et transmettant un effort de 3 000 daN, les points périphériques de la roue ont effectivement parcouru 10 015 m ; ce pseudo-glissement est sensiblement proportionnel à l'effort. Mais, à partir d'une valeur T_1 de cet effort, l'interpénétration des surfaces et le pseudo-glissement font place à un glissement pur.

Le *coefficient d'adhérence* est égal à : $a = \frac{T_1}{Q} = \frac{t_1}{p}$, l'adhérence étant caractérisée par une force dirigée perpendiculairement à l'interface $\left(t_1 = \frac{T_1}{S}\right)$.

2° Dans une seconde phase, on observe un déplacement généralisé, un glissement proprement dit, introduisant un frottement. L'effort tangentiel s'établit alors à une valeur T_2 qui est généralement inférieure à T_1 et va en décroissant.

Le *coefficient de frottement* est égal à : $f = \frac{T_2}{Q} = \frac{t_2}{p}$, le frottement étant caractérisé par une force agissant dans le plan de l'interface $\left(t_2 = \frac{T_2}{S}\right)$.

Pour chaque nature de contact on peut établir une courbe donnant la variation de $\frac{t}{p}$ en fonction du déplacement x du parallélépipède (fig. II-2). Notons que l'on retrouve bien

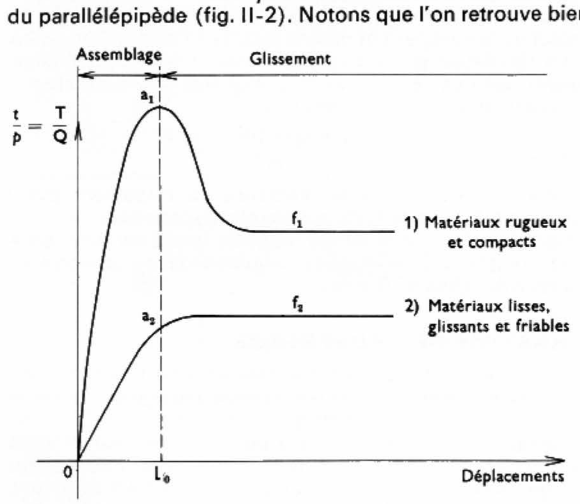


Fig. II-2 — Coefficients d'adhérence (a) et de frottement (f) ; $l_0 \approx 500\ \mu m$ pour les métaux et 5 mm pour le caoutchouc

la loi générale de la variation du coefficient de frottement (en situation non lubrifiée) en fonction du laps de temps t pendant lequel les deux surfaces sont restées, antérieurement, en contact sans déplacement relatif :

$$f_t = f_\infty - (f_\infty - f_0)\,e^{-\alpha t} \quad \text{(fig. II-3)}$$

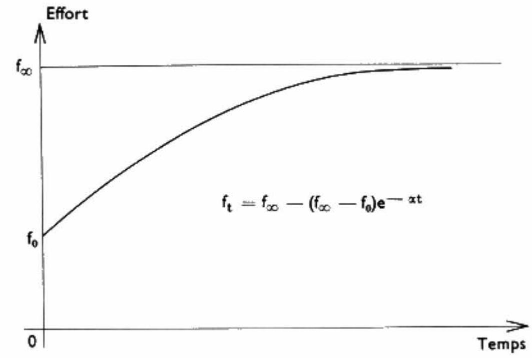


Fig. II-3 — Variation du coefficient de frottement entre deux surfaces en fonction de la durée du contact préalable

où f_∞ et f_0 sont respectivement les valeurs trouvées après un stationnement prolongé et lors d'un déplacement à très grande vitesse et où α est un coefficient dépendant des caractéristiques géométriques et physiques des surfaces. Chacun sait, d'une part, que l'effort requis pour translater une caisse est très grand au départ puis décroît au fur et à mesure que la vitesse du déplacement croît et, d'autre part, que les amplitudes des vibrations d'une corde de violon croissent lorsque la vitesse de l'archet diminue.

2.2. Contact roue sur rail

1° *Roue motrice*. — En réalité le phénomène d'adhérence d'une roue sur un rail est plus complexe que celle d'un parallélépipède parce que :

— ni la charge Q, ni l'effort T ne se répartissent uniformément sur l'empreinte ; de ce fait, les distributions de $p(x, y)$ et de $t(x, y)$ ne sont plus homothétiques entre elles ;

— au même instant et dans la même empreinte certaines aires sont en situation d'assemblage, d'autres en situation de glissement, car on trouve, près du bord d'entrée, des éléments qui sont assemblés et pour lesquels t est inférieur ou égal à $a \cdot p_1$ et près du bord de sortie, des éléments qui glissent et pour lesquels t est égal à $f \cdot p_2 = t_2$.

Au fur et à mesure que le rapport $\frac{T}{Q}$ augmente, la zone de glissement progresse vers le bord d'entrée (fig. II-4).

Pour simplifier, reprenons l'empreinte rectangulaire pour laquelle p et t ne sont des fonctions que de x, abscisses de l'empreinte se déplaçant dans la longueur $2L$ avec origine au bord d'entrée. Un observateur fixe, situé sur l'empreinte elle-même, voit un point tel que A se déplacer à la vitesse $-V$, le bord d'entrée étant l'origine. Si τ est la déformation tangentielle du point A des deux surfaces considérées et c la raideur élastique des maté-

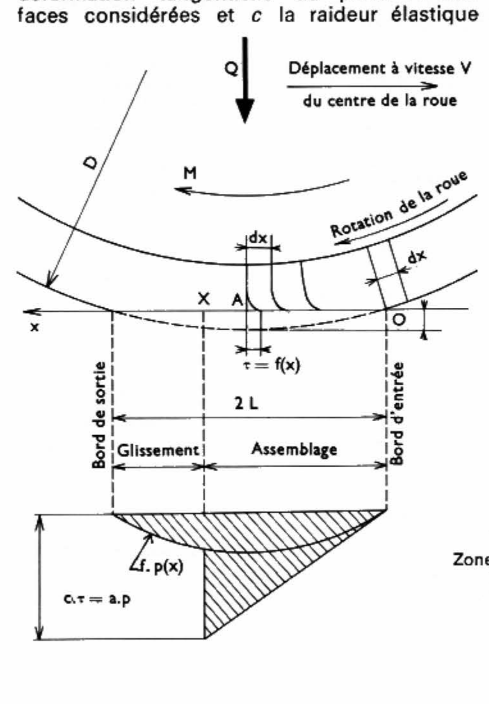


Fig. II-4

Zones du contact roue-rail (*Stagni*)

riaux $t = c\tau$ avec $t = 0$ au bord d'entrée; sous réserve que $\frac{2L}{D}$ reste faible, t croît avec x jusqu'à atteindre la valeur $(a.p)$ pour une certaine abscisse X, le gradient $\frac{dt}{dx}$ étant constant puisque deux points A et B de la jante de roue, originairement distants de dx, doivent demeurer fixes sur le rail (il faut pour cela $dx - \tau_A + \tau_B = Cte$ donc $\tau_A - \tau_B = Cte$). Au-delà de X, t serait supérieur à $(a.p)$ ce qui est impossible par définition; de X au bord de sortie, un glissement doit nécessairement se produire avec $t = f.p$.

Au total la valeur de l'effort tangentiel T_M transmissible est représentée par la surface hachurée de la figure II-4 dont l'aire est:

$$\frac{1}{2} X.a.p(X) + \int_X^{2L} f.p(x).dx$$

aire dont on peut calculer le maximum en fonction de a et de f.

Mais deux remarques essentielles s'imposent immédiatement:

a) Le contact acier sur acier est pratiquement irréalisable, les surfaces étant toujours polluées. La valeur maximale T_M de T, soit $0{,}5\,Q$, est en fait rarement atteinte; dans certains cas extrêmes, T_M peut devenir inférieur à $0{,}1\,Q$ lorsque, sous l'effet du roulement, des liquides forment un coin fluide sous pression qui diminue la profondeur d'accrochage et le volume d'interpénétration.

b) Dans les conditions d'adhérence statique (ou pseudo-glissement) le coefficient f se réfère à des glissements élémentaires ayant lieu à la température ambiante; dans les conditions de glissement généralisé (ou patinage franc), la variation de température due au frottement modifie à chaque instant les conditions du contact. Les paramètres directeurs du frottement (charge, vitesse relative, états microgéométrique et physico-chimique des surfaces, etc.) ne peuvent être définis qu'avant le départ du processus de glissement. Dès que le frottement apparaît, tous ces paramètres subissent des altérations considérables et interdépendantes les unes des autres.

L'intense énergie calorifique dégagée lors du frottement roue sur rail se partage entre les deux surfaces, en fonction des états physiques des matériaux qui les constituent et selon des conditions totalement différentes de celles qui s'établissent en régime continu: le contact étant bref, la répartition n'est pas proportionnelle aux conductivités des matériaux et les lois de l'évolution font intervenir le temps et l'espace à la puissance $\frac{1}{2}$ ($\sqrt{t}$ et $\sqrt{x}$ puisque les dérivées à l'origine doivent être infinies). La répartition de l'énergie est proportionnelle au coefficient d'arrachement thermique: $\sqrt{\lambda.q_s.\rho}$; dans cette formule: λ est la conductivité thermique, supposée constante lorsque la température θ varie; q_s est la chaleur massique; ρ est la masse volumique;

Au contact roue sur rail, la chaleur produite par unité de temps est sensiblement proportionnelle à $V^{1/2}.Q^{1/4}$ (notons que l'influence de la vitesse est supérieure à celle de la charge, ce que chacun de nous peut corroborer en se frottant les mains) ; elle provoque une élévation de température qui peut entraîner la fusion de l'un des matériaux et produire, à la fois, une diminution importante de f et une dégradation rapide de la surface. La quantité de chaleur reçue par unité de surface frottante varie dans le même sens que le produit (température à l'interface × surface qui défile devant la pièce par unité de temps); dans le cas du patinage au démarrage, le rail s'échauffe plus, donc s'use plus, que la roue.

Le fait que f diminue lorsque le temps et la vitesse relative croissent indique clairement que tout patinage, une fois amorcé, ne peut s'arrêter de lui-même.

Toute l'énergie motrice disponible ayant pour effet d'accroître la vitesse de rotation d'une roue patinante et d'accélérer le processus de patinage et de dégradation, tout progrès dans le domaine de l'adhérence d'une roue motrice implique des améliorations portant à la fois sur les conditions globales du contact roue-rail et sur les dispositions à prendre pour obtenir, en toute circonstance, la meilleure utilisation de ce contact.

2° *Roue porteuse — Roulement pur.* — Dans ce cas, la notion d'adhérence n'intervient que lors du freinage. En l'absence de force tangentielle, c'est-à-dire en présence de frottements élémentaires de roulement pur, la résistance au roulement provient des déformations plastiques des aspérités, déformations qui croissent avec la charge et aussi avec la vitesse (du fait de l'hystérésis survenant lors de la relaxation dans la partie de la roue quittant le contact). Aussi, pour une voiture voyageurs, on estime la résistance au roulement r égale à $\left(1{,}5 + \frac{V^2}{4\,500}\right)$ en décanewtons par tonne si V est exprimé en kilomètres par heure. De même, sur route, la résistance au roulement double, pratiquement, lorsqu'on passe de 50 à 150 km/h.

3. AMÉLIORATIONS DES QUALITÉS D'ADHÉRENCE DU CONTACT ROUE SUR RAIL

L'équation $T = a\,Q$ met en valeur que l'effort de traction transmissible est fonction du facteur a qui dépend des qualités du contact et du facteur Q; celui-ci est fonction des modalités d'application de la masse de la locomotive.

3.1. La qualité du contact. — Le procédé le plus utilisé pour augmenter la valeur limite du coefficient d'adhérence est le sablage; pour qu'il soit efficace il faut que le sable soit distribué dans l'angle roue-rail.

Le nettoyage mécanique du rail (à l'égard de l'eau, de la graisse, etc.) et l'étincelage électrique ont également été essayés, en particulier à la S.N.C.F.

Quoi qu'il en soit, lorsque la vitesse augmente, la valeur limite de l'adhérence diminue du fait de la diminution du temps de contact roue-rail qui entraîne une diminution du volume plastiquement déformé. Jusqu'à 250 km/h, on peut admettre, avec Koffmann, que $a = \frac{50}{V + 120}$, V étant exprimée en kilomètres par heure. Pour les très grandes vitesses, les Japonais adoptent $a = \frac{13{,}6}{V + 85}$. On peut également établir des diagrammes tels que celui de la figure II-5, fixant les puissances maximales à la jante.

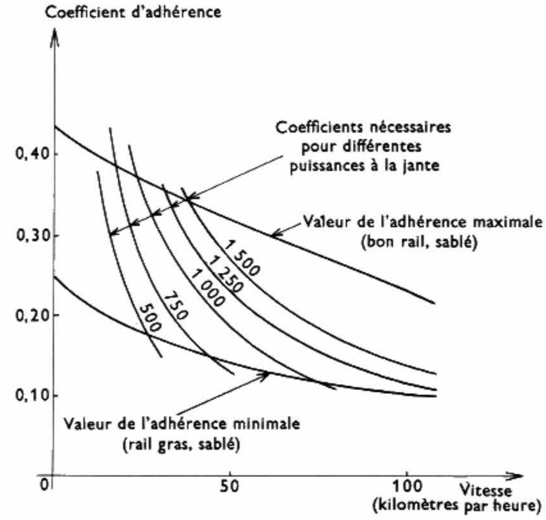


Fig. II-5 — Adhérence en fonction de la vitesse d'un essieu chargé à 29 tonnes

Les automobiles de course adoptent, de leur côté, des pneus dont la largeur de la table de roulement dépasse 30 cm afin d'obtenir une adhérence suffisante à grande vitesse.

3.2. Modalités d'application de la masse d'une locomotive sur les roues motrices. — La charge instantanée Q appliquée par une roue, sujette à deux types de variations, s'écrit:

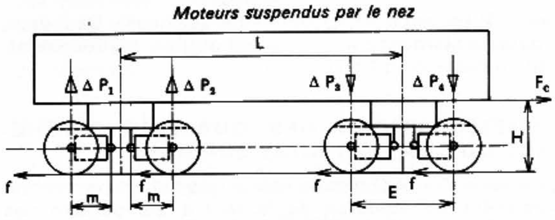
$$Q' = Q \text{ statique} + dQ_g + dQ_d$$

dQ_g étant les transferts de masse dus à la géométrie de la locomotive;
dQ_d étant les transferts de masse dus aux inerties et aux forces dynamiques.

1° Les pertes de charge adhérente résultent du cabrage donc dépendent de facteurs dynamiques dont les plus importants sont les types de liaison essieu-bogie et bogie-caisse (fig. II-6). Pour limiter ces déchargements,

Fig. II-6 — Perte de charge ΔP dans divers cas

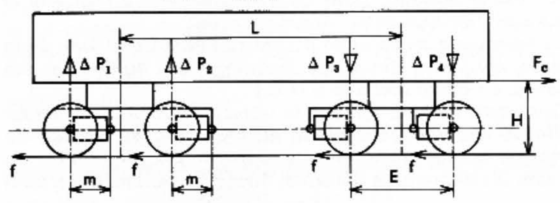
Moteurs suspendus par le nez



Moteurs orientés en sens opposé

$$\Delta P_1 = -\frac{F_c H}{2L} - \frac{F_c R}{4m}\left(1 - \frac{E}{L}\right) \qquad \Delta P_3 = -\Delta P_2$$

$$\Delta P_2 = -\frac{F_c H}{2L} + \frac{F_c R}{4m}\left(1 + \frac{E}{L}\right) \qquad \Delta P_4 = -\Delta P_1$$

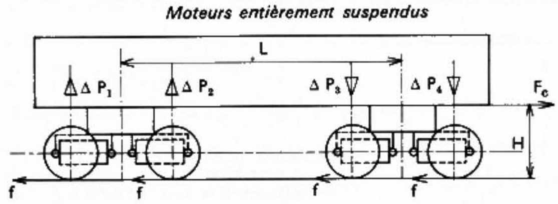


Moteurs orientés dans le même sens

$$\Delta P_1 = -\frac{F_c H}{2L} \qquad \Delta P_3 = -\Delta P_2$$

$$\Delta P_2 = -\frac{F_c H}{2L} \qquad \Delta P_4 = -\Delta P_1$$

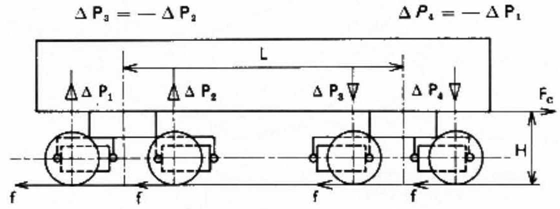
Moteurs entièrement suspendus



Moteurs orientés en sens opposé

$$\Delta P_1 = -\frac{F_c H}{2L} \qquad \Delta P_2 = -\frac{F_c H}{2L}$$

$$\Delta P_3 = -\Delta P_2 \qquad \Delta P_4 = -\Delta P_1$$



Moteurs orientés dans le même sens

$$\Delta P_1 = -\frac{F_c H}{2L} \qquad \Delta P_2 = -\frac{F_c H}{2L}$$

$$\Delta P_3 = -\Delta P_2 \qquad \Delta P_4 = -\Delta P_1$$

(Nouvion et Bernard)

on adopte la traction basse et on assujettit les châssis de bogie à rester parallèles à la caisse (fig. II-7).

2° Les variations dynamiques sont dues:
— À ce que les roues ne sont pas parfaitement circulaires ni les rails parfaitement rectilignes.
— À la réaction élastique sous l'effet des réactions verticales.
— À l'influence des masses (roues, essieux, etc.) qui reposent directement sur le rail (masses dites non suspendues).

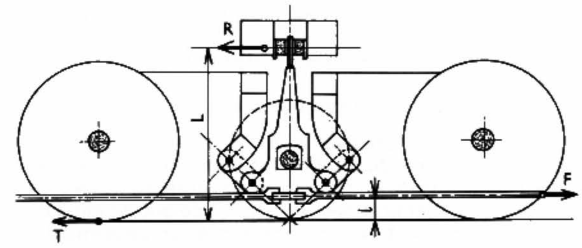


Fig. II-7 — Dispositif articulé de traction avec barres de traction basse d'une locomotive Diesel

L'influence de ces facteurs dynamiques va croissant avec la vitesse si bien que le coefficient d'adhérence global diminue lorsque la vitesse croît.

Les facteurs favorables à une diminution des variations dynamiques dQ_d sont la liberté du mouvement vertical des essieux, les faibles masses suspendues et l'accroissement de l'inertie des masses tournantes. Si l'on ne prend aucune des mesures ci-dessus mentionnées à l'égard de dQ_g et dQ_d, on peut avoir:

$$0{,}6\,Q < Q' < 1{,}4\,Q$$

4. LA DYNAMIQUE DU PATINAGE

En cas d'amorce de patinage d'un essieu moteur, pour que la vitesse de rotation ω ne croisse jusqu'à la destruction mécanique tandis que l'effort de traction appliqué au train disparaît, il faut et il suffit que l'effort moteur T appliqué à la jante diminue plus rapidement que l'effort résistant R dû au frottement, c'est-à-dire que le gradient $\frac{dT}{d\omega}$ soit négatif et, en valeur absolue, supérieur à $\frac{dR}{d\omega}$ (fig. II-8).

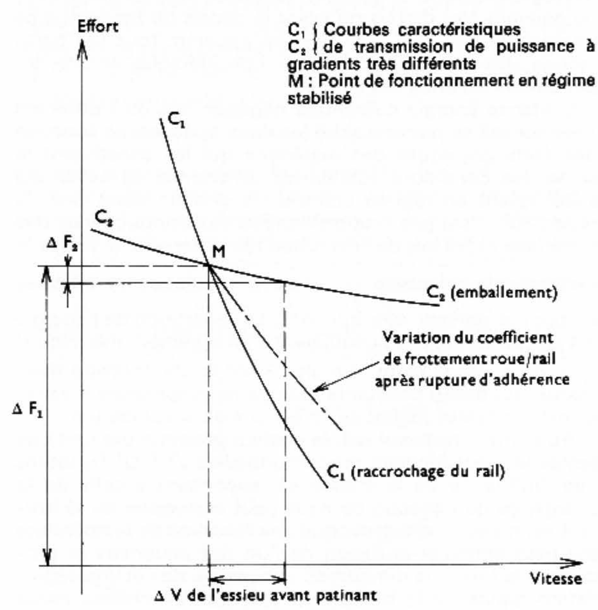


Fig. II-8 — Importance de la caractéristique effort moteur = f (vitesse) sur la dynamique du patinage

Toute locomotive dont la puissance à la jante dépasse 15 kW par tonne de masse adhérente peut connaître des régimes d'instabilité d'effort de traction. Il faut concevoir en conséquence les équipements moteurs des locomotives: dispositif d'alerte en cas de patinage, système automatique de réduction de l'effort, sablage automatique, etc. De tels dispositifs s'avèrent indispensables pour que les coefficients d'adhérence admissibles qui étaient, encore naguère, de 0,16 atteignent 0,33 comme sur les locomotives modernes et que les charges remorquables croissent du simple au double. Cela justifie le bien-fondé des recherches qui furent effectuées, durant ces dernières années, dans le domaine fondamental de l'adhérence.

CHAPITRE III
LA TRACTION À VAPEUR

La traction à vapeur est appelée à disparaître à très brève échéance ; elle est partout remplacée soit par la traction électrique, soit par la traction Diesel. Cependant, comme elle assure encore un certain trafic nous donnerons ci-après une description sommaire de la locomotive à vapeur.

Cette locomotive (fig. III-1) est en réalité une machine à vapeur horizontale, à piston à double effet et sans condensation, comprenant :

— une chaudière ;

— un châssis monté sur des essieux et supportant la chaudière ;

— un mécanisme moteur qui transmet aux essieux le mouvement résultant du travail de la vapeur dans les cylindres.

1. CHAUDIÈRE

La chaudière des locomotives à vapeur est composée de trois parties assemblées les unes aux autres :

— la boîte à feu renfermant le foyer ;

— le corps cylindrique entourant les tubes à fumée ;

— la boîte à fumée comprenant la cheminée et les appareils assurant le tirage.

L'eau vaporisée entre les parois du foyer et de la boîte à feu et au-dessus des tubes à fumée s'accumule dans l'espace libre à l'intérieur de la chaudière et dans le dôme placé sur le corps cylindrique. La pression limite de la vapeur, appelée *timbre*, est généralement comprise entre 15 et 20 bars.

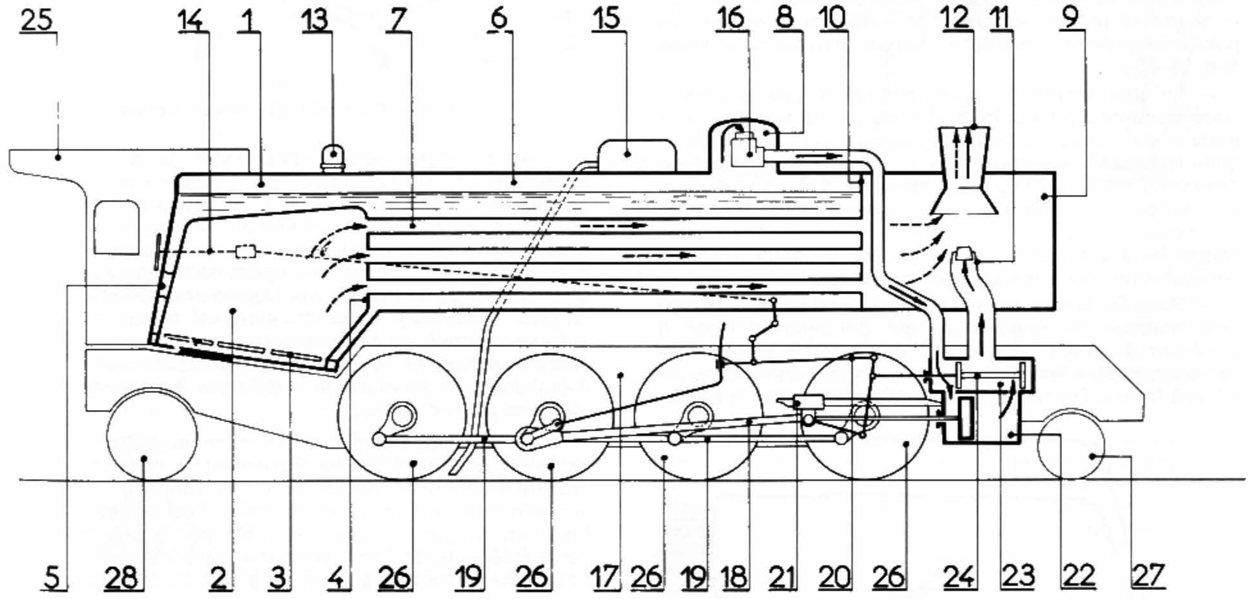


Fig. III-1 — Schéma d'une locomotive à vapeur

Trajet de la vapeur — Trajet des gaz de combustion

1. Boîte à feu
2. Foyer
3. Grille
4. Plaque tubulaire du foyer
5. Porte du foyer
6. Corps cylindrique
7. Tubes à fumée
8. Dôme
9. Boîte à fumée
10. Plaque tubulaire de boîte à fumée
11. Échappement
12. Cheminée
13. Soupape de sûreté
14. Vis de changement de marche
15. Sablière
16. Régulateur
17. Longerons de châssis
18. Bielle motrice
19. Bielle d'accouplement
20. Mécanisme de distribution
21. Tête de piston
22. Cylindre
23. Boîte à vapeur
24. Tiroir
25. Abri du mécanicien
26. Essieux moteurs
27. Essieu du bissel avant
28. Essieu du bissel arrière

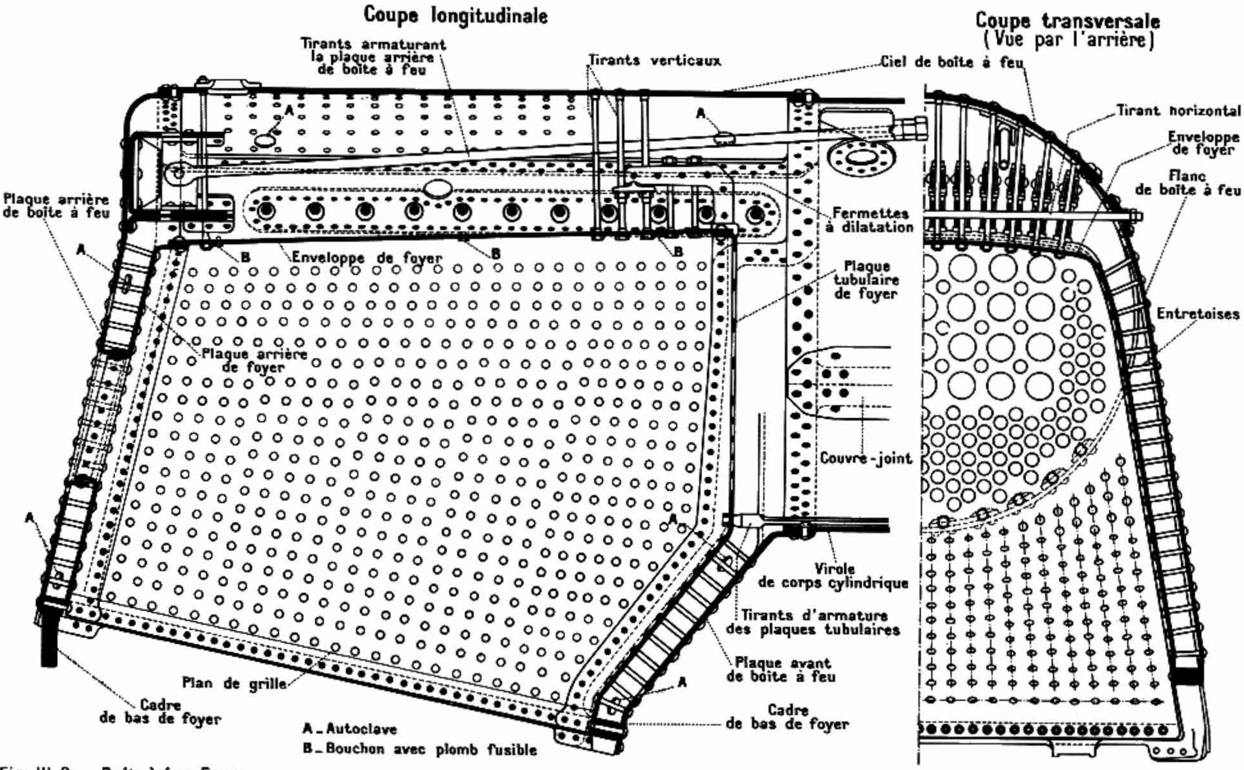


Fig. III-2 — Boîte à feu. Foyer

1.1. Boîte à feu - Foyer. — La boîte à feu est une sorte de caisse constituée de plusieurs plaques en tôles d'acier doux rivées entre elles ; la plaque arrière comporte une ouverture dans laquelle on monte la porte de foyer. Le foyer est constitué de tôles d'acier doux soudées entre elles ; il est monté à l'intérieur de la boîte à feu à laquelle il est assemblé d'une manière très rigide, d'une part à la partie inférieure par l'intermédiaire du cadre de bas de foyer, et, d'autre part, tout autour, par un grand nombre d'entretoises et de tirants, petites barres d'acier vissées dans les tôles de boîte à feu et de foyer et dont les têtes sont rivées ou soudées (fig. III-2).

— La tôle arrière de foyer comprend une ouverture correspondant à celle de la boîte à feu pour le montage de la porte et au niveau du cadre de bas de foyer est montée la grille recevant le combustible sous laquelle est disposé un cendrier. La tôle avant du foyer constitue la plaque tubulaire de foyer qui reçoit l'extrémité des tubes à fumée. Une voûte en briques réfractaires est montée à l'avant du foyer pour brasser les gaz de combustion et faciliter la combustion des particules de charbon entraînées par les gaz.

— Dans les locomotives puissantes modernes se trouve une chambre de combustion qui prolonge le foyer à l'intérieur du corps cylindrique (fig. III-3) et permet une combustion plus complète des gaz avant leur entrée dans les tubes à fumée. De même, on monte dans le foyer un dispositif destiné à créer dans la boîte à feu une circulation d'eau qui augmente le rendement de vaporisation de la chaudière. Parmi ces dispositifs, le plus utilisé est le siphon Nicholson, sorte de bouilleur reliant les parties avant et supérieure du foyer (fig. III-4).

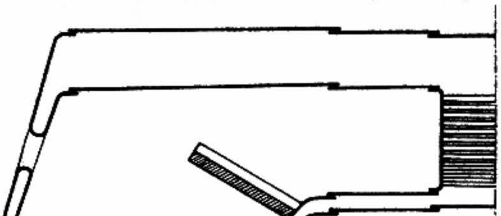


Fig. III-3

Foyer à chambre de combustion

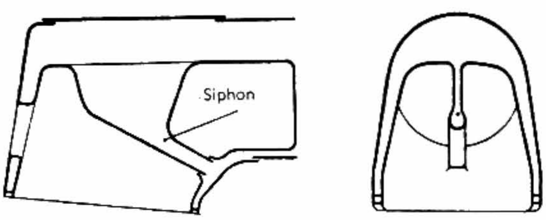


Fig. III-4 — Foyer muni d'un siphon Nicholson

— Aussi longtemps que les surfaces de grilles ont été inférieures à 5 m², la charge du combustible a été manuelle, c'était une opération souvent fort pénible : il fallait compter une allure de combustion d'environ 400 kg/m² à l'heure. Ensuite, les locomotives ayant une surface de grille de 5 m² et plus en général, on les a équipées de chargeurs mécaniques (fig. III-5) du type Stoker (même pour celles à surface de grille inférieure). Le combustible est amené du tender (véhicule attelé à la locomotive, qui transporte son approvisionnement en eau et combustible) par une vis d'Archimède et distribué sur la grille par des jets de vapeur réglables par le chauffeur.

— Le développement de l'extraction du pétrole dans le monde a conduit à utiliser également le mazout pour la chauffe des locomotives. Le brûleur est monté à l'avant et à la partie inférieure du foyer ; le mazout est projeté dans le foyer par un jet de vapeur réglable par le chauffeur. La partie inférieure du foyer est garnie de briques réfractaires pour protéger les parois soumises à l'action de la flamme.

1.2. Corps cylindrique - Boîte à fumée - Surchauffeur - Échappement. — Le corps cylindrique est formé de deux ou trois viroles en tôle d'acier doux, rivées les unes aux autres, ainsi qu'à la partie avant de la boîte à feu. À l'avant du corps cylindrique est rivée la plaque tubulaire de la boîte à fumée qui reçoit l'extrémité avant des tubes à fumée. Les tubes à fumée sont de deux sortes : les gros tubes d'un diamètre de 125 à 140 mm, dans lesquels sont montés

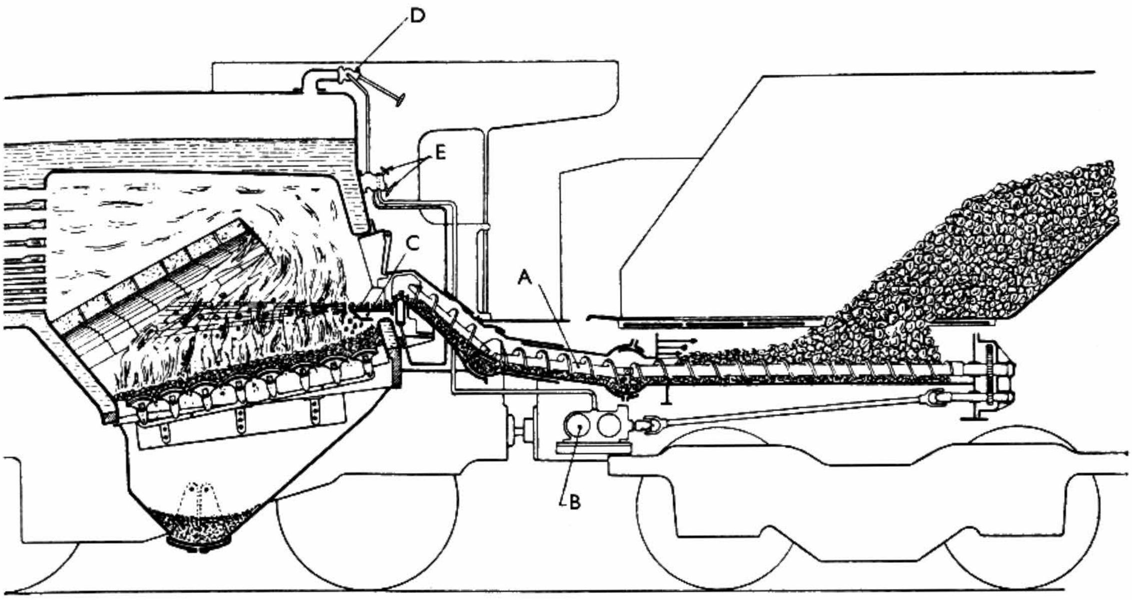


Fig. III-5 — Chargeur mécanique
Stoker : ensemble

A - Vis d'Archimède
B - Moteur à vapeur entraînant la vis
C - Table de distribution
D - Robinet de prise de vapeur
E - Robinets de réglage du moteur et des jets de distribution

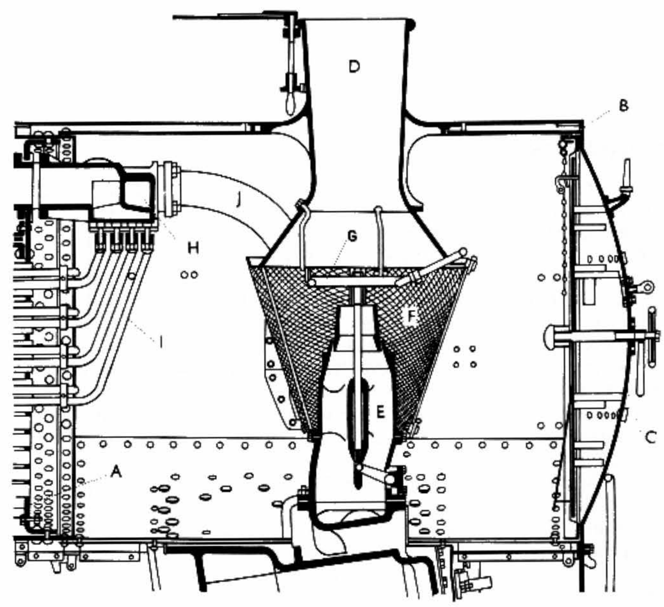


Fig. III-6 — Boîte à fumée : ensemble

A - Plaque tubulaire de boîte à fumée
B - Plaque avant de boîte à fumée
C - Porte de boîte à fumée
D - Cheminée
E - Colonne d'échappement
F - Grille à flammèches
G - Souffleur
H - Collecteur de surchauffe
I - Éléments surchauffeurs
J - Conduit d'admission

les tubes des éléments surchauffeurs et les petits tubes d'un diamètre de 45 à 60 mm.

— Le corps cylindrique est prolongé par la boîte à fumée (fig. III-6) constituée d'une virole en tôle, rivée à la virole avant de corps cylindrique. À l'intérieur de la boîte à fumée, qui reçoit la plus grande partie des escarbilles entraînées par les gaz de combustion, sont montés le collecteur de surchauffe et la colonne d'échappement de vapeur des cylindres (surmontée par l'échappement et la cheminée).

— Dans le dôme, placé au-dessus du corps cylindrique, se trouve le régulateur, organe de distribution de la vapeur. Il est réglable par le mécanicien et commande en fait la marche de la locomotive.

— Du régulateur, la vapeur passe dans la chambre de vapeur saturée du collecteur de surchauffe et elle est distribuée dans les tubes de surchauffe (toutes les locomotives modernes sont à surchauffe). Après passage dans ces tubes, la vapeur est dirigée dans la chambre de vapeur surchauffée du collecteur et conduite ensuite directement aux cylindres. Il existe plusieurs types de surchauffeurs, le Schmidt étant de beaucoup le plus répandu.

— L'échappement est un appareil du genre éjecteur placé au-dessus de la colonne d'échappement de vapeur des cylindres. Il assure le tirage nécessaire à la combustion en utilisant la vapeur d'échappement des cylindres. L'échappement est fixe ou variable suivant que la section de passage de vapeur à travers l'appareil est constante ou peut être réglée en marche par le mécanicien. Dans les très puissantes locomotives, le volume des gaz de combustion et de vapeur d'échappement à évacuer est tel que l'on est conduit à utiliser deux échappements côte à côte avec deux tuyères et deux cheminées.

1.3. Alimentation des chaudières. — Pendant fort longtemps elle a été assurée depuis le tender au moyen de deux injecteurs refoulants ou aspirants suivant les cas, dont un à gros débit et l'autre à débit plus faible. Sur les locomotives les plus récentes on a monté un *réchauffeur d'eau* qui, par une pompe, envoie dans la chaudière de l'eau réchauffée par mélange avec un prélèvement de vapeur d'échappement des cylindres. Les types de réchauffeurs les plus employés sont l'A.C.F.I., le Knorr et le Worthington. Un injecteur de secours est néanmoins monté en supplément du réchauffeur.

1.4. Accessoires de chaudière. — Les principaux accessoires de chaudière sont les suivants :

a) Un *manomètre* indiquant la pression.

b) Les *plombs ou bouchons fusibles*, pièces montées au nombre de deux ou trois dans le ciel de foyer, qui provoquent

la projection de l'eau de la chaudière sur le charbon de la grille lorsque la température des tôles devient trop élevée par suite d'une baisse trop prononcée du niveau de l'eau (risques d'accidents très graves et même d'explosion).

c) Les *indicateurs de niveau d'eau* donnant continuellement la hauteur du niveau de l'eau dans la chaudière et montés dans l'abri du mécanicien à l'arrière de la boîte à feu.

d) Deux *soupapes de sûreté* montées sur la chaudière au voisinage de la boîte à feu.

e) Les *autoclaves*, tampons de visite pour permettre le détartrage périodique des tôles.

f) Un *robinet de vidange* monté à la partie inférieure de la boîte à feu.

g) Une *nourrice de prise de vapeur* montée sur le ciel de la boîte à feu; elle permet la distribution de vapeur aux organes auxiliaires (injecteur, pompe à air du frein, chauffage, etc.).

h) Un *souffleur*, couronne circulaire percée de trous montée sur la colonne d'échappement, alimenté par de la vapeur vive; il permet d'assurer le tirage pendant les arrêts et lorsque les cylindres ne travaillent pas.

i) Une *enveloppe*, tôle isolante qui entoure la chaudière, l'espace compris entre la tôle et la chaudière étant rempli de matelas garnis de matière isolante telle que l'amiante ou la soie de verre.

2. CHÂSSIS

Le châssis est l'ensemble constitué de deux longerons longitudinaux réunis par des traverses extrêmes et des entretoises intermédiaires en acier moulé ou soudé; il supporte la chaudière, sert de bâti aux organes moteurs et repose lui-même sur les essieux par l'intermédiaire des ressorts de suspension et des boîtes à huile.

Les longerons, en tôle d'acier de 25 à 35 mm d'épaisseur dans la construction française ou en barres d'acier forgé ou moulé de 100 à 150 mm d'épaisseur dans la construction américaine, sont découpés au droit des essieux pour former des ouvertures recevant les boîtes à huile ou boîtes d'essieux. À l'avant de ces ouvertures bordées par les guides de boîtes est disposé un coin de rattrapage de jeu (automatique dans les machines les plus récentes) qui sert à annuler le jeu pris en service par les boîtes à huile dans leur logement.

Les cylindres sont encastrés dans une portée ajustée. La chaudière est solidement fixée au châssis mais des dispositions spéciales sont appliquées pour permettre la dilatation de la chaudière qui atteint parfois 25 mm. Les dernières locomotives américaines ont toutes reçu des châssis monoblocs en acier moulé dans lesquels les longerons, les traverses et les cylindres ne forment qu'une seule pièce de fonderie; certains de ces châssis atteignent une masse proche de 40 tonnes et constituent des pièces de fonderie remarquables (fig. III-7).

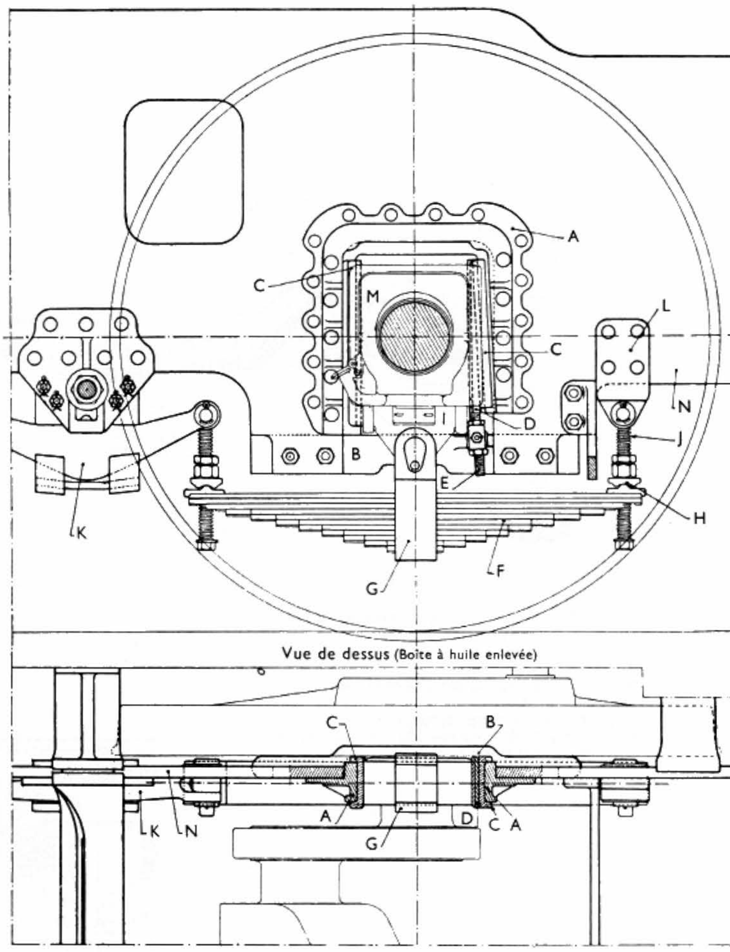


Fig. III-8 — Ensemble boîte à huile — suspension au droit d'un essieu

A. Guide de boîte
B. Entretoises de cornes de plaque de garde
C. Cales de guides de boîte
D. Coin de rattrapage de jeu
E. Tige de réglage du coin
F. Ressort de suspension
G. Bride de ressort
H. Platines à côtes
I. Étrier de bride de ressort
J. Tige de suspension
K. Balancier
L. Point fixe de suspension
M. Boîte à huile
N. Longerons

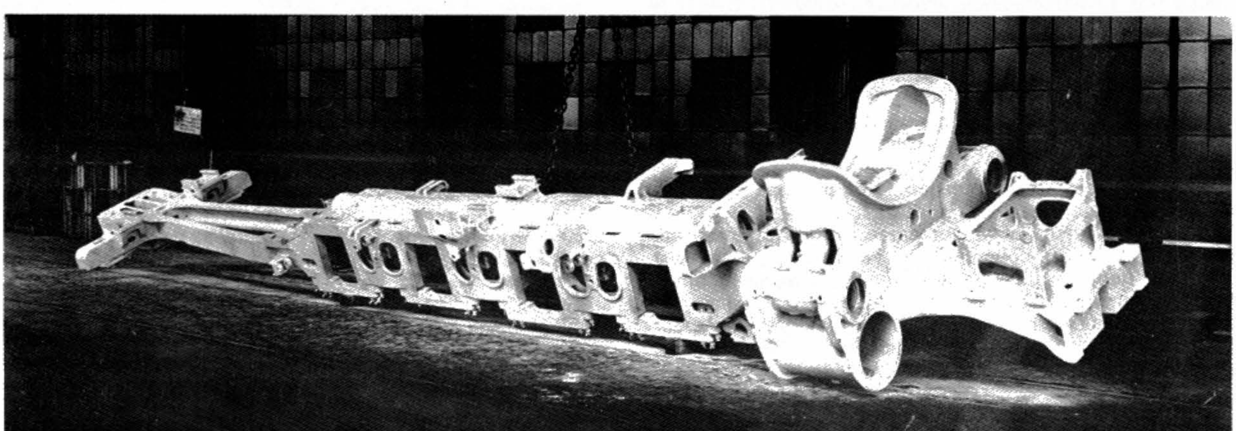


Fig. III-7 — Châssis monobloc en acier moulé de locomotive Delaware et Hudson 4-8-4 (*S.N.C.F.*)

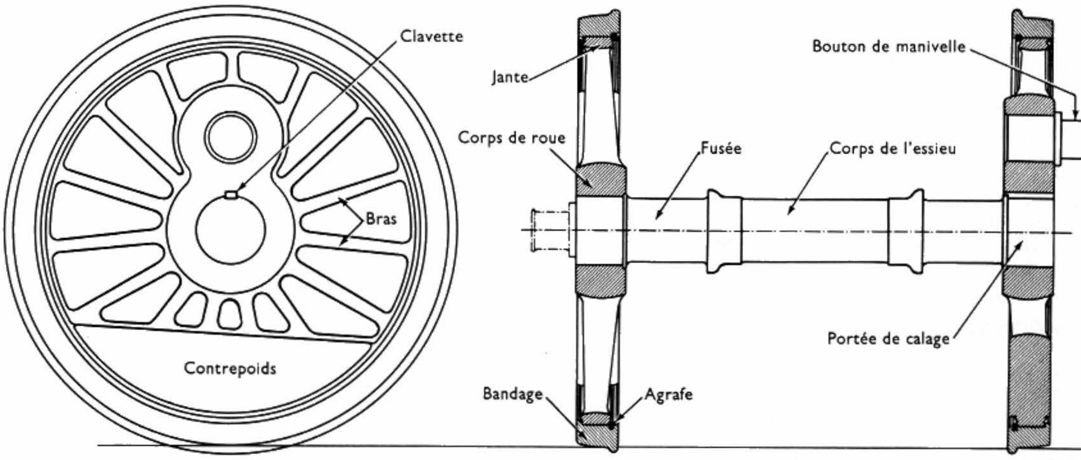


Fig. III-9

2.1. Suspension - Boîtes à huile. — Le châssis repose sur les boîtes à huile par l'intermédiaire de ressorts de suspension à lames (fig. III-8). Ces ressorts sont disposés au-dessus ou au-dessous des boîtes et la charge du châssis leur est transmise par des tiges de suspension. D'une manière générale, les ressorts des essieux moteurs sont reliés entre eux par des balanciers qui assurent une répartition invariable de la charge sur les différents essieux.

Les boîtes d'essieux, qui transmettent finalement la charge aux essieux, comprennent un dessus de boîte dans lequel sont montés un coussinet en bronze régulé reposant sur la fusée d'essieu et un dessous de boîte formant réservoir d'huile et contenant un tampon graisseur (il graisse la fusée de l'essieu). Des rondelles obturatrices empêchent les poussières de pénétrer dans la boîte. Sur les locomotives les plus modernes les boîtes d'essieux sont à roulements à rouleaux.

2.2. Essieux (fig. III-9). — Un essieu complet ou essieu monté est composé d'un essieu-axe et de deux corps de roues munis de bandages qui roulent sur le rail.

L'essieu-axe en acier forgé comprend deux fusées qui reçoivent les coussinets de boîtes à huile et les portées de calage sur lesquelles sont calés à la presse les corps de roues en acier moulé. Les boutons de manivelle sur lesquels sont montés les bielles sont également calés à la presse dans les corps de roue des essieux moteurs. Lorsque la locomotive comporte des cylindres intérieurs, le corps d'essieu situé entre les fusées est coudé pour recevoir les tourillons de bielles intérieures ; l'essieu est alors construit en plusieurs éléments assemblés à la presse ou calés à chaud.

2.3. Bandages. — Le bandage (fig. III-10) est constitué d'un cercle en acier dur posé à chaud, avec un léger serrage, sur la jante du corps de roue et c'est lui qui est directement en contact avec le rail. D'un profil spécialement étudié, le bandage comporte à sa partie inférieure et du côté intérieur à la voie une saillie appelée *boudin* qui se raccorde du côté extérieur avec la surface de roulement en forme de cône incliné à 2,5 %, cela afin de toujours ramener la roue sur le milieu de la voie. La fixation du bandage est complétée par une agrafe circulaire montée dans une rainure et qui porte contre la jante de la roue.

On appelle *cercle de roulement* le cercle suivant lequel le bandage roule théoriquement sur le rail ; en voie normale, il est situé à 750 mm du milieu de l'essieu ; le diamètre de ce cercle est le diamètre de la roue et l'épaisseur du bandage est comptée dans son plan. Les bandages de locomotives ont 140 mm de largeur ; leur épaisseur à l'état neuf varie de 70 mm (anciennes locomotives) à 90 mm ; les bandages sont mis au rebut lorsqu'ils ont subi une usure de 35 à 40 mm suivant les types de machines, après avoir été retournés plusieurs fois au profil convenable.

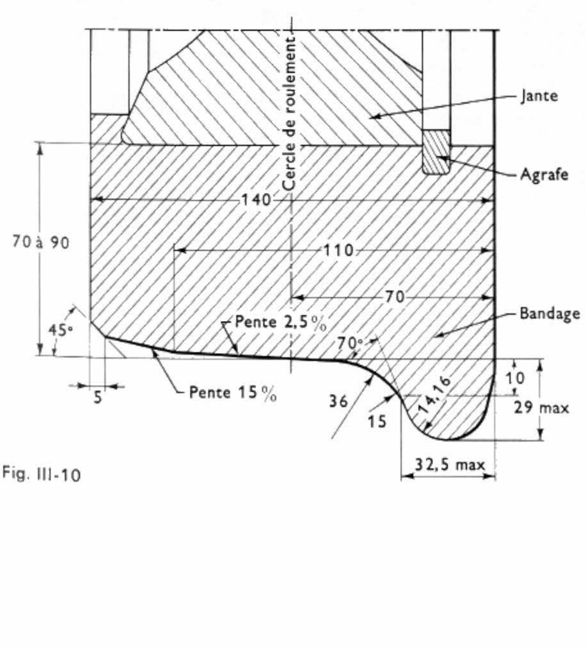


Fig. III-10

2.4. Roues monoblocs. — Ce sont des roues en acier forgé, trempées superficiellement. D'un diamètre relativement faible, elles sont constituées d'un moyeu et d'une toile reliant ce dernier à la jante qui, à l'extérieur, a le profil exact d'un bandage. Ces roues sont employées pour les essieux porteurs de locomotives à vapeur et de tenders, et d'une manière exclusive sur tout le matériel roulant remorqué récent ainsi que sur les essieux moteurs des locomotives électriques ou Diesel dont le diamètre des roues est beaucoup plus faible que celui des essieux moteurs de locomotives à vapeur. Leur tenue en service est bien meilleure que celle des roues bandagées de même diamètre ; elles sont employées depuis longtemps en Amérique du Nord où elles sont surtout confectionnées en fonte trempée.

2.5. Passage en courbe. — Dans le but de permettre le passage des locomotives dans les courbes, ces parties de voies sont prévues avec une largeur d'autant plus grande que le rayon est plus faible. L'écartement des rails qui est de 1,437 m en alignement droit atteint 1,465 m dans les courbes de rayon inférieur à 200 m.

Ce jeu supplémentaire dans la voie n'étant cependant pas suffisant pour permettre le passage en courbes, aussi emploie-t-on les artifices suivants pour augmenter le jeu des essieux dans la voie ou pour obtenir que l'axe de la locomotive s'écarte sensiblement de l'axe de la voie, surtout à ses extrémités :

a) *Amincissement des boudins :* on diminue l'épaisseur des boudins de certains essieux, en général ceux du milieu.

b) *Essieux à déplacement :* des dispositions sont prises pour permettre à l'essieu de se déplacer latéralement de chaque côté et un système de rappel est prévu pour le ramener dans l'axe après le passage en courbe.

c) *Bogies et bissels :* ce sont des petits véhicules, placés à l'avant et à l'arrière des locomotives, capables de tourner autour d'un axe vertical et susceptibles de prendre un déplacement par rapport à l'axe de la locomotive (jusqu'à

150 mm de chaque côté). Un dispositif de rappel tend à ramener le véhicule dans l'axe de la locomotive après le passage de la courbe. Dans les bogies, l'axe vertical de rotation est situé au centre du véhicule.

Les bissels ont généralement un seul essieu, plus rarement deux; l'axe de rotation est situé en dehors de l'essieu.

Les bogies sont placés à l'avant des locomotives à grande vitesse; les bissels sont montés à l'arrière de ces dernières ainsi qu'à l'avant et à l'arrière des locomotives mixtes ou à marchandises. Les essieux des bogies et bissels des locomotives à vapeur sont exclusivement porteurs et de faible diamètre.

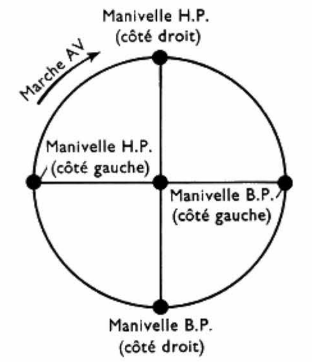


Fig. III-11

Locomotives compound; calage des manivelles

3. MÉCANISME

Les locomotives à vapeur peuvent être classées suivant le mode d'utilisation de la vapeur en locomotives à *simple expansion* et locomotives *compound*.

3.1. Locomotives à simple expansion. — La vapeur admise dans les cylindres à double effet s'y détend, puis s'échappe dans l'atmosphère en traversant la colonne d'échappement. Les machines à simple expansion comportent généralement deux cylindres extérieurs aux longerons dont les manivelles sont calées à 90°, parfois trois cylindres, deux extérieurs aux longerons et un intérieur; les manivelles sont alors calées à 120° les unes des autres.

3.2. Locomotives compound. — La vapeur travaille d'abord dans les cylindres à haute pression ou H.P. puis est dirigée dans les cylindres à basse pression ou B.P. où elle se détend une seconde fois avant d'être évacuée à l'atmosphère par la colonne d'échappement.

Les avantages du compoundage sont les suivants:

— Utilisation maximale de la détente de la vapeur, réduction des pertes par condensation, bon équilibrage mécanique de la locomotive. Il complète heureusement l'emploi de la vapeur surchauffée. Cependant, sur les locomotives compound, l'obligation d'utiliser des mécanismes intérieurs et un essieu coudé rend leur entretien beaucoup plus coûteux que celui des locomotives à simple expansion. Les locomotives compound modernes sont à quatre cylindres deux H.P. et deux B.P.; le plus souvent, les cylindres H.P. sont extérieurs aux longerons et les cylindres B.P. sont à l'intérieur de ces derniers. Le calage des manivelles est celui de la figure III-11.

3.3. Cylindres et mécanisme. — Les cylindres, pistons, bielles, glissières sont du même type que dans les machines à vapeur à pistons ordinaires; des bielles d'accouplement transmettent le mouvement de l'essieu attaqué par la bielle motrice à tous les autres essieux moteurs qu'elles relient.

3.4. Distribution. — La distribution de vapeur dans les cylindres est réalisée au moyen de tiroirs (qui se déplacent dans la boîte à vapeur située à la partie supérieure du cylindre), parfois de soupapes; la grande majorité des locomotives est munie de tiroirs tous cylindriques. Le mouvement du tiroir est obtenu sur la presque totalité des locomotives au moyen du mécanisme type Walschaerts (fig. III-12) qui comporte une coulisse dans laquelle un coulisseau peut occuper différentes positions qui sont fixées en manœuvrant le changement de marche placé dans l'abri du mécanicien. Le sens de marche et le degré d'admission de vapeur aux cylindres, qui règle la marche de la locomotive, varient avec la position du coulisseau dans la coulisse. Les distributions à soupapes comportent toutes une soupape d'admission et une d'échappement sur chaque fond de cylindre. Le plus souvent ces distributions sont à cames oscillantes (type Dabeg); leur commande est obtenue par un mécanisme Walschaerts, comme pour les tiroirs. Il existe également des distributions à cames rotatives (types Dabeg, Caprotti, etc.) mais elles sont peu

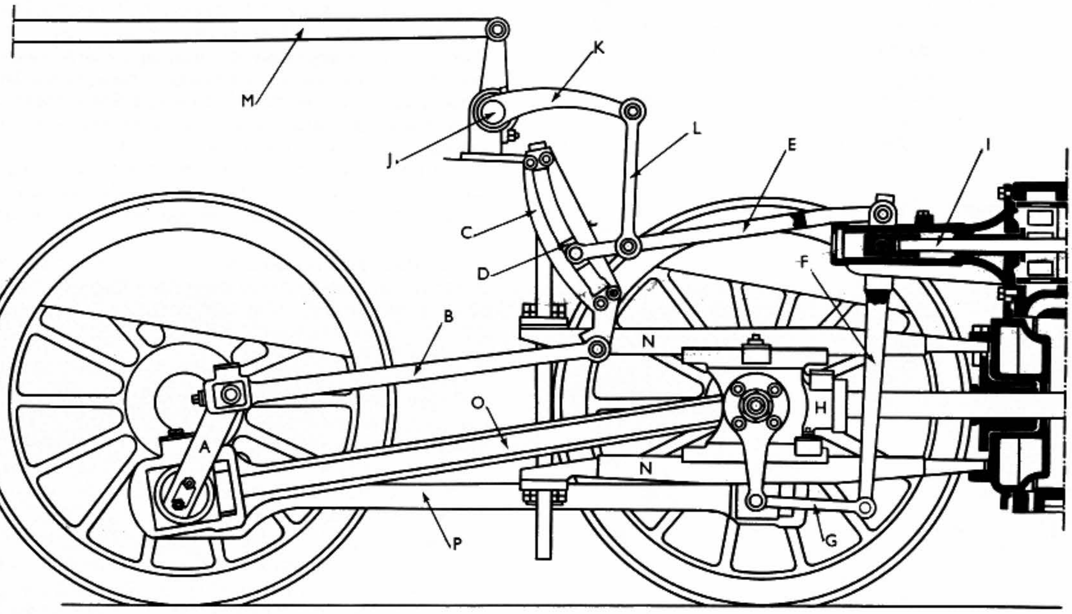


Fig. III-12 — Mécanisme de distribution Walschaerts

A. Contre-manivelle
B. Bielle de commande de la coulisse
C. Coulisse
D. Coulisseau
E. Bielle de commande du levier oscillant
F. Levier oscillant
G. Bielle reliant le levier oscillant à la tête du piston
H. Tête de piston
I. Tige du tiroir
J. Arbre de relevage
K. Levier de relevage
L. Bielle de relevage
M. Commande de l'arbre de relevage
N. Glissières
O. Bielle motrice
P. Bielle d'accouplement

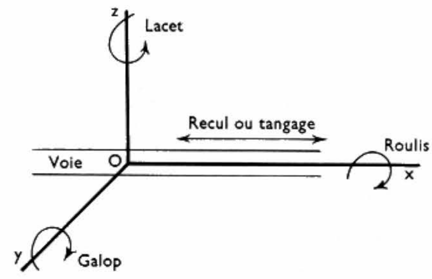
employées; leur commande est obtenue par un mécanisme spécial à partir d'une prise de mouvement fixée sur l'essieu moteur.

4. MOUVEMENTS PERTURBATEURS ET ÉQUILIBRAGE DES LOCOMOTIVES

En marche, les locomotives sont soumises à des mouvements perturbateurs qui, rapportés dans un système de trois axes dans l'espace, l'axe *Ox* étant confondu avec l'axe longitudinal de la locomotive, sont les suivants (fig. III-13) : rotation autour de l'axe vertical *Oz*, (lacet), rotation autour de l'axe *Oy* perpendiculaire au plan *Oxz* (galop), rotation autour de *Ox* (roulis) et mouvement relatif longitudinal sur *Ox* (recul).

Fig. III-13

Locomotives; mouvements perturbateurs



Ces mouvements perturbateurs proviennent soit de la circulation dans la voie (à cause des dénivellations, de l'élasticité des rails et des jeux entre boudins et rails), soit de la locomotive elle-même. L'effort de traction étant variable pendant un tour de roue, par suite de la variation effective de la pression de vapeur sur le piston, et la résistance du train étant constante il en résulte des mouvements de recul et de lacet. L'inclinaison des bielles motrices au cours de leur trajectoire donne naissance à une réaction de la poussée du piston sur les glissières qui tend à soulever les parties suspendues de la machine lesquelles sont, de plus, soumises aux oscillations des ressorts.

Il n'est pas possible d'équilibrer complètement les mouvements perturbateurs dus aux causes ci-dessus; tout au plus peut-on réduire sensiblement les mouvements de lacet par la valeur des efforts de rappel donnés aux bogies et bissels avant. La disposition des cylindres peut également diminuer l'importance de ces mouvements; une locomotive à trois ou quatre cylindres est en effet mieux équilibrée qu'une à deux cylindres (efforts de chaque cylindre moins grands, le calage des manivelles à 120° ou 180° équilibrant en partie les efforts perturbateurs des cylindres). Tous ces mouvements parasites seraient encore beaucoup plus importants si l'on ne prenait soin d'équilibrer les différentes parties en mouvement du mécanisme de la locomotive.

À cet effet, un contrepoids venu de fonderie avec chaque corps de roue motrice équilibre les masses excentrées du bouton de manivelle et de son moyeu ainsi que la masse des bielles d'accouplement et, s'il y a lieu, de la bielle motrice reposant sur le bouton de manivelle. Avec ce contrepoids en mouvement rotatif on utilise un contrepoids équilibrant partiellement un certain nombre de pièces du mécanisme (piston, tête de piston, partie de bielle motrice reposant sur l'axe de tête de piston) animées d'un mouvement alternatif.

5. ORGANES ACCESSOIRES DE LA LOCOMOTIVE - TRAITEMENT DES EAUX D'ALIMENTATION

5.1. Graissage. — Toutes les pièces en mouvement et toutes les parties en frottement de la locomotive font l'objet d'un graissage à l'huile, le graissage à la graisse n'étant utilisé que dans des cas particuliers. Dans toutes les locomotives encore utilisées, ce graissage a lieu mécaniquement, sous pression, à partir d'un graisseur constitué de plusieurs pompes à pistons plongeurs commandés par un mécanisme dont le mouvement est pris sur les essieux. On utilise toujours deux graisseurs, un pour le mécanisme (boîtes d'essieu, guides de boîtes, glissières, etc.), l'autre pour les cylindres et les boîtes à vapeur avec une huile plus épaisse. Les bielles, têtes de piston et certains organes en mouvement sont graissés par des graisseurs à main à débit contrôlé. Les boîtes d'essieu ont toujours un tampon graisseur même quand elles sont graissées mécaniquement.

5.2. Indicateur - Enregistreur de vitesse. — Dans l'abri, bien en vue à proximité du mécanicien, est monté un indicateur-enregistreur de vitesse. En France, on utilise l'appareil Flaman qui donne à chaque instant la vitesse de la locomotive, le mouvement de cet appareil étant pris sur un bouton de manivelle. Les vitesses, les temps, la position des signaux, le chauffage du train sont enregistrés par le Flaman sur une bande de papier qui se déroule automatiquement, ce qui permet de contrôler après coup toute la marche du train.

Un sifflet à air comprimé indique au mécanicien, par un son bref ou continu, si le signal qu'il vient de franchir était ouvert ou fermé. Le mécanicien doit d'ailleurs pointer à l'aide d'une manette sur la bande de papier tout signal fermé; la position de l'inscription ainsi obtenue par rapport à celle de l'inscription automatique au passage du signal fermé montre si le mécanicien a aperçu ou non la fermeture du signal avant d'arriver à son niveau.

5.3. Chauffage. — Pour le chauffage du train qu'elles remorquent, les locomotives possèdent une conduite qui est alimentée par de la vapeur prélevée à la nourrice des appareils auxiliaires.

5.4. Sablière. — Afin d'augmenter l'adhérence des roues motrices au cours des démarrages ou pour combattre des patinages de roues sur rails humides on utilise du sable contenu dans un bac disposé sur le corps cylindrique de la chaudière. Le sable est dirigé par des tuyaux vers l'avant ou l'arrière des essieux moteurs où il est projeté sur le rail à partir d'éjecteurs à air comprimé; cet air est envoyé depuis l'abri où se trouve un robinet manœuvrable par le mécanicien.

5.5. Freins. — Toutes les locomotives sont munies d'un frein automatique à air comprimé ou, dans certains pays, d'un frein à vide pour le freinage des trains et pour leur propre freinage. La locomotive comprend donc une installation spéciale d'appareils de freinage ainsi qu'un poste de manœuvre dans l'abri du mécanicien.

5.6. Abri - Tablier. — Un abri pour le mécanicien et le chauffeur est disposé à l'arrière des locomotives, au voisinage immédiat de la boîte à feu. À l'intérieur de l'abri on trouve toutes les commandes nécessaires à la conduite de la locomotive.

Un tablier en tôle entoure toute la locomotive à hauteur de la partie supérieure des roues motrices; il constitue le plancher de l'abri et permet la circulation autour de la chaudière ainsi que la visite de nombreux organes.

Sur de nombreuses locomotives, à l'avant et au droit de la cheminée, on dispose des écrans en tôle parallèles à l'axe de la locomotive; ils servent à éviter les rabattements de fumée le long de la locomotive, lesquels gênent considérablement la visibilité depuis l'abri pendant la marche.

5.7. Éclairage électrique. — Les locomotives sont toutes munies de l'éclairage électrique dans l'abri du mécanicien et pour les phares de signalisation; quelques lampes permettent également d'éclairer le mécanisme. Le courant est fourni par une turbodynamo alimentée par de la vapeur prélevée à la nourrice des appareils auxiliaires.

5.8. Graisseur de rails. — Dans une voie ferrée en courbe, le frottement des boudins de roues sur les rails provoque des grippages et arrachements de métal qui affectent la durée d'utilisation des bandages et des rails. Ces usures, suivant les types de machines et les voies, sont parfois très rapides et entraînent des frais d'entretien très élevés. Pour remédier à cet inconvénient, la S.N.C.F. et certains réseaux étrangers montent, aussi bien sur les locomotives à vapeur qu'électriques ou Diesel, des graisseurs de rails type Lubrovia. Ces appareils projettent automatiquement,

à l'aide d'air comprimé ou, à défaut, de vapeur, de l'huile sur le rail extérieur au passage de chaque courbe. Il suffit d'équiper un tiers des locomotives en service sur une ligne pour obtenir les économies désirées.

5.9. Traitement des eaux d'alimentation. — Les eaux naturelles servant à l'alimentation des chaudières contiennent des sels minéraux et donnent lieu à des formations de tartre qui, en se fixant sur les tôles et les tubes de la chaudière, nuisent à la transmission de la chaleur et conduisent à une dépense accrue de combustible. Certaines eaux sont également corrosives et attaquent tous les éléments de la chaudière.

Ces inconvénients obligent à des visites périodiques fréquentes et entraînent des immobilisations et des travaux d'entretien très coûteux ; on y pare en traitant chimiquement les eaux d'alimentation. En Amérique du Nord on épure les eaux à poste fixe dans les dépôts. En France, on pratique l'épuration sur la locomotive même par le *traitement interne intégral Armand* (*T.I.A.*), qui retire à peu près complètement aux eaux leur pouvoir corrosif et entartrant. L'épuration a lieu en utilisant un produit appelé *complexe* composé de plusieurs réactifs tels que extrait tannant et sels alcalins ; sa composition varie avec les caractéristiques chimiques de l'eau à traiter et il est introduit automatiquement dans l'eau à chaque remplissage du tender. Avec ce traitement il est nécessaire de pratiquer périodiquement, pendant la marche, des purges de déconcentration de l'eau de la chaudière pour éliminer les sels incrustants et limiter la teneur en sels dissous afin d'éviter des entraînements d'eau par le régulateur ; à cet effet, une vanne manœuvrable depuis l'abri du mécanicien est montée à la partie inférieure avant de la boîte à feu.

6. TENDERS ET LOCOMOTIVES-TENDERS

6.1. Tenders (fig. III-14). — À l'arrière de la locomotive on attelle un véhicule dénommé tender qui porte le charbon ou le mazout et l'eau nécessaires au fonctionnement de la locomotive. La capacité en eau transportée varie avec les locomotives ; en Europe les plus grandes capacités sont de 30 à 38 m^3 avec une charge correspondante de charbon de 10 à 11 tonnes ; en Amérique du Nord la capacité d'eau atteint 60 m^3 et la charge de charbon 30 tonnes.

La caisse à eau est confectionnée en tôles rivées ou soudées ; à l'intérieur elle est munie de tôles brise-lames pour empêcher les oscillations de l'eau en marche. Le remplissage se fait par des ouvertures appelées « *hausses* ». La soute à combustible (charbon ou mazout) placée à l'avant se prolonge souvent au-dessus de la caisse à eau.

La caisse est montée sur un châssis qui repose lui-même sur des essieux par l'intermédiaire de ressorts ; mais dès que la capacité nécessite plus de trois essieux le châssis repose sur deux bogies.

Dans les tenders accouplés à des locomotives possédant un chargeur mécanique, la soute à combustible comprend une partie surbaissée qui reçoit la vis d'Archimède utilisée pour alimenter le foyer en charbon et un coffre pour le moteur actionnant la vis. Différents coffres sont également aménagés pour les outils, les agrès de levage, les bidons

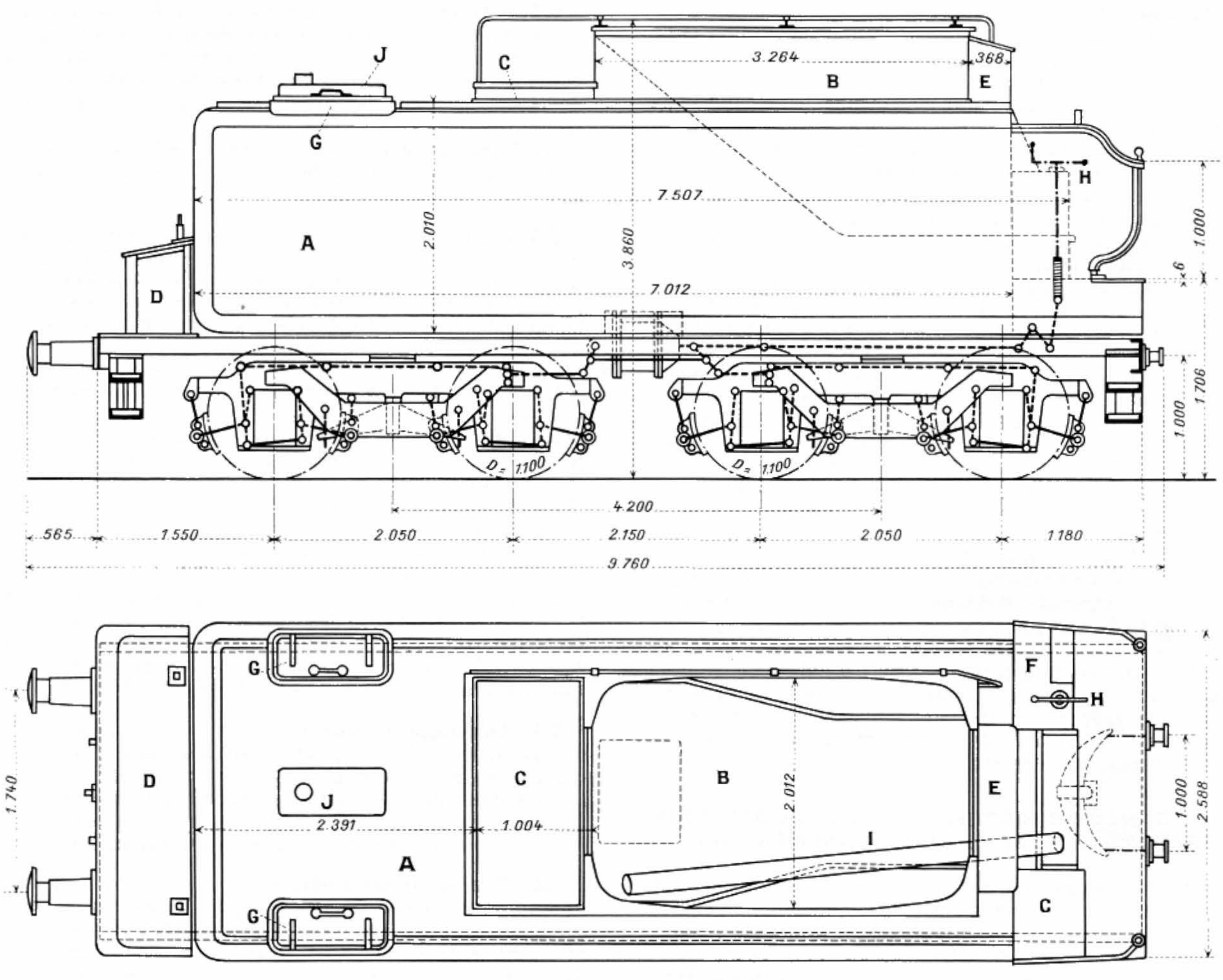


Fig. III-14 — Tender avec caisse à eau de 25 m^3 et approvisionnement en combustible de 9 000 kg

A. Caisse à eau
B. Soute à combustible
C. Soutes à briquettes
D. Coffre à outils d'arrière. Coffres à effets et à provisions
E. Coffre à outils d'avant
F. Coffre à essuyages et à huile
G. Hausses de prise d'eau
H. Frein à main
I. Gaine pour longs outils à feu
J. Distributeur-doseur de complexe pour le traitement des eaux d'alimentation

d'huile, etc. Souvent, un tube parallèle à l'axe du tender, traversant la cuve à charbon, reçoit les outils à feu tel le ringard ; cette disposition facilite la manœuvre de ces outils.

Dans certains réseaux, en Grande-Bretagne et aux États-Unis d'Amérique, en particulier, on emploie un dispositif spécial de prise d'eau en marche et en pleine voie. L'eau est placée dans une rigole située entre les rails ; en passant au-dessus de la rigole, depuis le tender on abaisse un tube de forme spéciale (« écope ») et, par la force vive due à la vitesse, l'eau monte dans le tube et se déverse dans la soute à eau.

L'attelage entre machine et tender doit être conçu spécialement pour que les mouvements relatifs des deux véhicules soient les plus faibles possible, étant donné la liaison rigoureuse qui doit être établie entre eux pour assurer la continuité de l'effort de traction et aussi pour la commodité du travail de l'équipe de conduite ; il existe de nombreux types de ces attelages.

6.2. Locomotives-tenders. — Pour certains trafics (faibles distances entre terminus, trafics de banlieue, manœuvre), on utilise des locomotives-tenders qui portent avec elles leur approvisionnement en combustible et en eau ; la soute à combustible est située derrière l'abri du mécanicien et les soutes à eau sont disposées de chaque côté du corps cylindrique. Ces locomotives sans tenders présentent l'avantage de pouvoir circuler aussi facilement dans les deux sens de marche et ne nécessitent pas de tournage sur plaque aux dépôts terminus.

7. CONDITIONS D'ÉTABLISSEMENT - CLASSIFICATION ET TYPES DE LOCOMOTIVES

Une locomotive est toujours construite en vue de développer un effort de traction tel qu'il assure la remorque facile d'un train de tonnage donné, sur une ligne de profil déterminé et cela dans certaines conditions de vitesse. On sait que l'effort de traction est fonction du poids adhérent de la locomotive ; en principe le rapport $\frac{P}{F}$ du poids adhérent à l'effort de traction, doit être tel qu'il soit plus grand que l'inverse du coefficient de frottement entre rail et bandage. Ce coefficient pouvant être considéré comme égal en moyenne à 0,25, il semblerait que $\frac{P}{F}$ devrait être égal à 4 environ. En réalité, ce rapport est toujours voisin de 3 car la valeur calculée de F est théorique et n'est jamais atteinte en service.

7.1. Poids adhérent. — Le poids sur rails ne peut dépasser la limite admise par la voie qui, en Europe, est de 18 à 23 daN suivant les lignes (cette limite dépasse 30 daN sur certaines lignes des États-Unis d'Amérique et du Canada). On est donc obligé de multiplier le nombre d'essieux moteurs pour obtenir des poids adhérents d'une certaine valeur. Les locomotives à grande adhérence ont en général cinq essieux moteurs accouplés. De bonnes conditions de passage en courbe et dans les appareils de voie sont difficiles à obtenir avec des locomotives à plus de cinq essieux, aussi lorsque le poids adhérent conduit à utiliser plus de cinq essieux a-t-on recours aux locomotives articulées (V. § 7.5).

7.2. Effort de traction-puissance. — L'effort de traction est proportionnel au timbre de la chaudière, à la course des pistons, au carré du diamètre des cylindres, au nombre des cylindres, et inversement proportionnel au diamètre des roues motrices.

Nous indiquerons ci-après les valeurs données à ces facteurs pour obtenir l'effort de traction maximal théorique qui atteint 30 000 daN en Europe et 60 000 daN aux États-Unis d'Amérique.

Le timbre des chaudières, assez longtemps limité à 16 bars, a été porté à 20 et même à 22 bars. Le diamètre des cylindres est limité par des questions d'encombrement. Dans les locomotives compound où les cylindres B.P. sont généralement à l'intérieur des longerons, c'est l'écartement de ces derniers qui limite le diamètre. À l'extérieur des longerons le diamètre est limité par l'inscription dans le gabarit.

La course des pistons, qu'il y aurait intérêt à rendre la plus grande possible, doit permettre à la tête de bielle motrice de se loger dans le gabarit lorsque le bouton de manivelle est dans sa position la plus basse. Les grandes courses ont de plus l'inconvénient d'entraîner des grandes vitesses linéaires des organes du mécanisme facilitant les chauffages ; la course des pistons varie de 640 à 810 mm ; elle est le plus couramment de 700 mm.

Le diamètre des roues motrices est fonction de la vitesse à réaliser car, en raison des forces d'inertie, le nombre de tours par minute ne peut guère dépasser 400. Les locomotives de vitesse (130 km/h environ) sont donc munies de roues de grand diamètre (1,900 à 2,000 m) et toutes choses égales par ailleurs, leur effort de traction est diminué, ce qui se traduit par une moins bonne aptitude à monter les rampes et par des démarrages moins aisés avec de fortes charges à remorquer. Les locomotives à grande adhérence, pour trains de marchandises ou de montagne, sont au contraire équipées des roues de faible diamètre (1,350 à 1,500 m) ; l'effort de traction est augmenté mais la vitesse limite est réduite à environ 80 km/h.

La seule caractéristique de chaudière qui intervient dans la valeur de l'effort de traction (en réalité, force de la locomotive limitée par l'adhérence) est celle du timbre, lequel n'est pas fonction des dimensions de la chaudière. Il en est tout autrement en ce qui concerne la puissance de la locomotive qui permet à cette dernière de réaliser un travail maximal dans un temps déterminé. La chaudière doit pouvoir assurer le débit suffisant de vapeur correspondant au travail exigé dans le temps. Les dimensions de la chaudière constituent donc le principal facteur de la puissance de la locomotive puisque la capacité de production de vapeur en dépend uniquement. Cette capacité de vaporisation qui conditionne la puissance dépend de la surface de grille, de la section de passage des gaz à travers les tubes à fumée, de la surface de chauffe, de l'allure de combustion. La surface de grille est très variable ; en Europe, elle varie de 3 à 5 m^2 ; aux États-Unis d'Amérique elle atteint jusqu'à 11 m^2. L'allure de combustion est normalement de 400 kg au mètre carré de surface de grille et à l'heure ; elle peut atteindre 600 à 700 kg mais ces dernières allures même avec chargeur mécanique, ou des allures équivalentes avec la chauffe au mazout, ne peuvent être soutenues que pendant un temps très court. En effet, on fatigue trop la chaudière et, de plus, le rendement tend rapidement à baisser sensiblement aux fortes allures de combustion.

7.3. Classification des locomotives. — On classe les locomotives suivant le nombre et la disposition des essieux. Chaque machine est repérée par un nombre dont le premier chiffre indique le nombre d'essieux porteurs à l'avant, le second chiffre le nombre d'essieux moteurs, le troisième chiffre le nombre d'essieux porteurs arrière. Les essieux porteurs peuvent être des essieux de bogies ou de bissels. À chaque nombre définissant un type de locomotive correspond une désignation d'origine américaine (V. chap. 4 § 5).

À titre d'exemple :

— Le type *Pacific* est représenté par 231 (un bogie à deux essieux à l'avant, trois essieux moteurs, un bissel arrière à un essieu).

— Le type *Mountain* est représenté par 241 (un bogie à deux essieux à l'avant, quatre essieux moteurs, un bissel arrière à un essieu).

— Le type *Decapod* est représenté par 150 (un bissel avant à un essieu et cinq essieux moteurs).

7.4. Types et exemples de locomotives. — Les locomotives à grande vitesse sont du type 231 (Pacific) ou pour les trains plus lourds du type 241 (Mountain). La figure III-15, donne les caractéristiques des dernières locomotives Mountain de la S.N.C.F.

Les locomotives qualifiées de mixtes qui conviennent aussi bien pour les trains express lourds à vitesse limitée que pour les trains de marchandises de tonnage normal sont du type Mikado (141). La figure III-16 donne les caractéristiques des dernières locomotives Mikado de la S.N.C.F., construites en 1945 aux États-Unis d'Amérique sous la direction d'ingénieurs de la S.N.C.F.

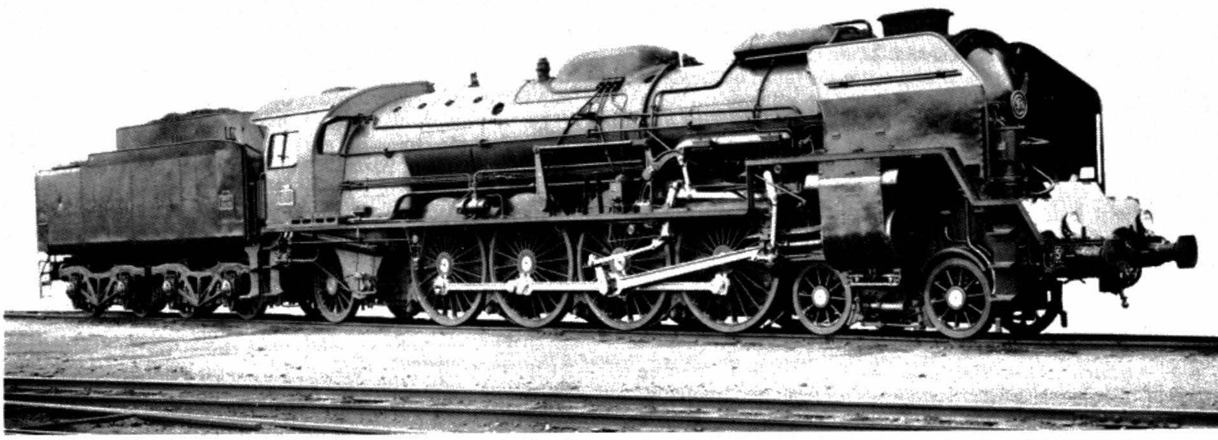


Fig. III-15 — Locomotive 241 P compound à 4 cylindres, à surchauffe, à stoker, type Mountain (*S.N.C.F.*)

Timbre	20 bars
Grille — Longueur	2,511 m
Grille — Largeur	2,012 m
Grille — Surface	5,052 m²
Tubes à fumée — Petits — Nombre	141
Tubes à fumée — Petits — Diamètre intér.	49 mm
Tubes à fumée — Gros — Nombre	33
Tubes à fumée — Gros — Diamètre intér.	135 mm
Section de passage des gaz dans les tubes	0,5614 m²
Surface de chauffe — du foyer	29,43 m²
Surface de chauffe — des tubes	215,14 m²
Surface de chauffe — totale	244,57 m²
Surface de surchauffe	108,38 m²
Diamètre intérieur moyen du corps cylindrique	1,818 m

Cylindres H.P. intérieurs — Diamètre	446 mm
Cylindres H.P. intérieurs — Course	650 mm
Cylindres B.P. extérieurs — Diamètre	674 mm
Cylindres B.P. extérieurs — Course	700 mm
Diamètre des roues — Bogie	1,020 m
Diamètre des roues — Motrices	2,020 m
Diamètre des roues — Bissel	1,350 m
Effort théorique de traction	20 040 daN
Masse de la machine — à vide	120,150 t
Masse de la machine — en ordre de marche	131,4 t
Poids adhérent	80 000 daN
Empattement rigide	4,200 m
Empattement total	13,460 m
Longueur entre tampons de la machine	17,172 m
Déplacement latéral du bogie	100 mm
Déplacement latéral du bissel	95 mm

Caractéristiques particulières :

Réchauffeur d'eau *A.C.F.I.*
Surchauffeur *Houlet.*
Chargeur mécanique *Stoker.*
Cylindres H.P. intérieurs entre premier et deuxième essieu moteur, attaquant le troisième essieu moteur.
Distribution *Walschaerts* à tiroirs cylindriques H.P. et B.P. à commandes conjuguées.

Tender :

Capacité en eau	34 m³
Approvisionnement en combustible — menu	10,8 t
Approvisionnement en combustible — briquettes	1,2 t
Empattement total	6,550 m
Masse totale en ordre de marche	84 t

Longueur totale entre tampons, machine et tender .... 27,117 m

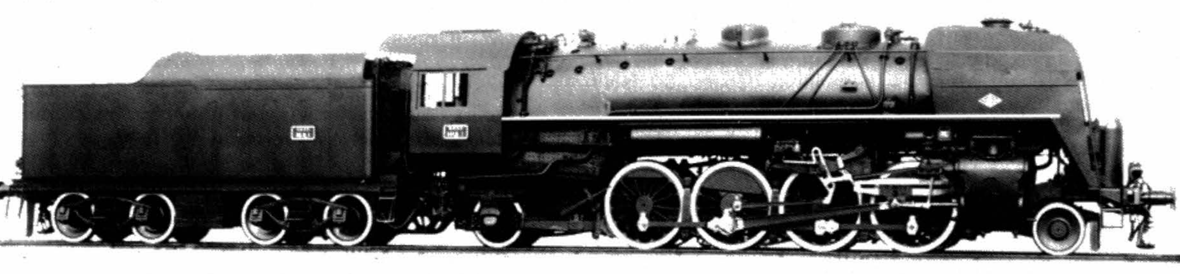


Fig. III-16 — Locomotive 141 R à simple expansion, deux cylindres, à surchauffe, type Mikado (*S.N.C.F.*)

Timbre	15,46 bars
Grille — Longueur	2,594 m
Grille — Largeur	1,987 m
Grille — Surface	5,16 m²
Tubes à fumée — Petits — Nombre	175
Tubes à fumée — Petits — Diamètre intér.	45,8 mm
Tubes à fumée — Gros — Nombre	36
Tubes à fumée — Gros — Diamètre intér.	128,5 mm
Section de passage des gaz dans les tubes	0,59 m²
Surface de chauffe — du foyer	27,22 m²
Surface de chauffe — des tubes	218,87 m²
Surface de chauffe — totale	246,09 m²
Surface de surchauffe	65,40 m²
Diamètre intérieur moyen du corps cylindrique	1,954 m

Cylindres — Diamètre	0,597 m
Cylindres — Course	0,711 m
Diamètre des roues — Bissel AV	0,915 m
Diamètre des roues — Motrices	1,650 m
Diamètre des roues — Bissel AR	1,067 m
Effort théorique de traction	23 265 daN
Masse de la machine — à vide	105,300 t
Masse de la machine — en ordre de marche	115,500 t
Poids adhérent	78 400 daN
Empattement rigide	5,181 m
Empattement total	10,870 m
Longueur entre tampons de la machine	14,639 m
Déplacement latéral du bissel AV	0,114 m
Déplacement latéral du bissel AR	0,130 m

Caractéristiques particulières :

Chargeur mécanique *Stoker.*
Régulateur à soupapes multiples dans le collecteur de surchauffe.
Réchauffeur d'eau type *Worthington.*
Servomoteur de changement de marche type *Franklin.*
Surchauffeur *Schmidt.*
Boîtes à rouleaux *Timken* aux bissels.

Tender :

Capacité en eau	30 m³
Approvisionnement en combustible — menu	10,5 t
Approvisionnement en combustible — briquettes	1 t
Empattement total	6,223 m
Masse totale en ordre de marche	72 t

Longueur totale entre tampons, machine et tender .... 24,160 m



Fig. III-17 — Locomotive Mallet à quatre cylindres, simple expansion à surchauffe, type 1-4-4-2 du Baltimore and Ohio (États-Unis d'Amérique)

Timbre			16,52 bars
Grille	Longueur		4,496 m
	Largeur		2,427 m
	Surface		10,91 m²
Tubes à fumée	Petits	Nombre	63
		Diamètre	57,1 mm
	Gros	Nombre	177
		Diamètre	101,6 mm
Surface de chauffe	du foyer		70,23 m²
	des tubes		421,95 m²
	totale		492,18 m²
Surface de surchauffe			196,76 m²
Diamètre intérieur moyen du corps cylindrique			2,441 m

Cylindres extérieurs	Diamètre	0,609 m
	Course	0,812 m
Diamètre des roues	Bissel AV	0,838 m
	Motrices	1,625 m
	Bissel AR	1,067 m
Effort théorique de traction		59 995 daN
Masse de la machine en ordre de marche		285,180 t
Poids adhérent		215 600 daN
Empattement rigide		3,403 m
Empattement total		19,862 m

Caractéristiques particulières :

Chargeur mécanique.
Châssis de chaque train d'essieux coulé monobloc avec les cylindres.
Boîtes d'essieu à rouleaux à tous les essieux.

Tender :

Capacité en eau	83,315 m³
Approvisionnement en combustible	25,400 t
Masse totale en ordre de marche	137,894 t
Empattement total, machine et tender	34,290 m

Pour les trains de marchandises lourds (trains de charbon ou de minerai), on utilise des locomotives du type 150 ou 151. Les locomotives de manœuvre sont des machines-tenders à adhérence totale à quatre ou cinq essieux moteurs (040 ou 050), sans essieux porteurs.

7.5. Locomotives articulées. — Lorsqu'on est conduit à dépasser le nombre de cinq essieux moteurs, on a recours aux locomotives articulées qui permettent de résoudre la difficulté d'inscription en courbes d'un grand nombre d'essieux moteurs (7 à 8) et aussi d'obtenir de grands poids adhérents.

7.5.1. Locomotive Mallet. — Dans ces machines, toute la boîte à feu et la partie arrière du corps cylindrique sont reliées au châssis d'un train moteur arrière, comme dans une locomotive ordinaire, et toute la partie avant de la chaudière repose simplement sur le train moteur avant qui peut se déplacer sous elle à la manière d'un bogie. Chaque train moteur a ses cylindres et les mécanismes avant et arrière n'ont aucune liaison entre eux. La vapeur d'admission et d'échappement des cylindres du train avant circule dans des conduits articulés à rotules pour tenir compte des déplacements relatifs de ce train par rapport à la chaudière.

Un grand nombre de locomotives américaines de marchandises sont du type Mallet, la figure III-17 en donne un exemple.

7.5.2. Locomotives Garratt. — Dans ces machines, la chaudière est supportée par un châssis très résistant qui repose sur deux trains d'essieux moteurs ; ceux-ci portent les approvisionnements d'eau et de charbon. Ces deux trains sont écartés de façon à dégager complètement le dessous de la chaudière. Tous les cylindres sont reliés à la chaudière par des conduits de vapeur articulés. Ces locomotives ont une grande facilité d'inscription en courbe ; elles permettent de loger facilement de grosses chaudières. Leur emploi s'est beaucoup développé en Afrique, surtout dans les réseaux à voie étroite comportant de nombreuses courbes à faible rayon.

8. ESSAIS DES LOCOMOTIVES

Les locomotives sont essayées en ligne pour déterminer leur puissance et leurs possibilités ainsi que pour les comparer les unes aux autres du point de vue de leur consommation.

Les conditions d'essais en ligne pouvant cependant être très variables d'un jour à l'autre (variations de l'état atmosphérique, arrêt imprévu à des signaux, etc.) il a été nécessaire de mettre au point des bancs d'essais à poste fixe qui éliminent ces causes d'erreurs. Il en existe quelques exemplaires seulement dans le monde entier.

Nous donnons ci-après la description du banc d'essais de la S.N.C.F. de Vitry-sur-Seine.

Banc d'essais de la S.N.C.F. (fig. III-18 et III-19). — Ce banc permet d'essayer les locomotives à vitesse, puissance indiquée et puissance à la jante constantes. Le banc d'essais est constitué par un ensemble de huit rouleaux qu'on peut déplacer de manière à amener leurs entraxes

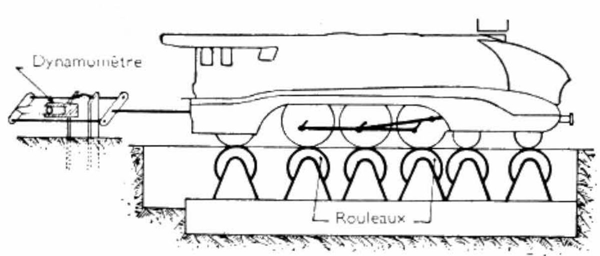


Fig. III-18 — Schéma de banc d'essais

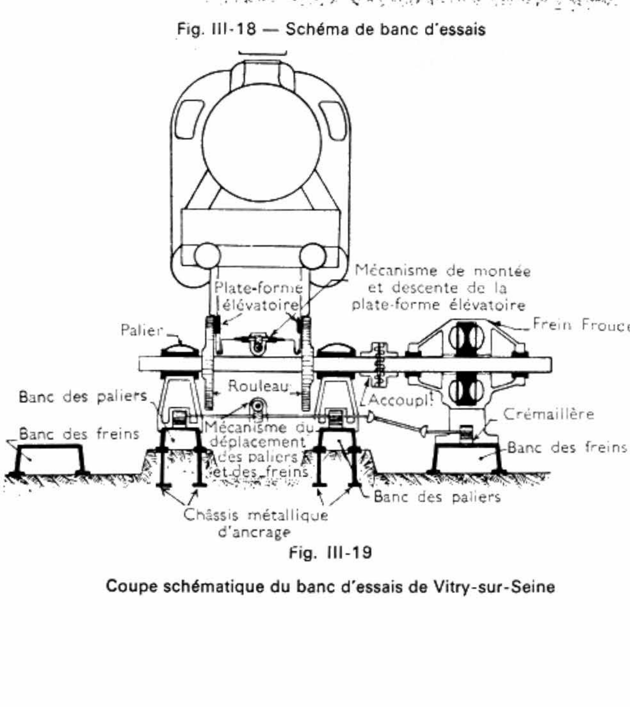


Fig. III-19

Coupe schématique du banc d'essais de Vitry-sur-Seine

à la cote des entraxes des essieux de la locomotive. Chacun des essieux de la locomotive repose sur un rouleau qu'il entraîne par frottement dans son mouvement. Les essieux porteurs (bissel, bogie) restent immobiles sur leurs rouleaux. Chaque rouleau peut supporter un essieu chargé à 30 t.

La locomotive est attelée par une barre d'attelage à un point fixe et solidement amarrée à un châssis métallique de 21 m de longueur, qui fait également support des rouleaux et qui est noyé dans un massif en béton de 1 000 t environ.

Pour permettre à la machine d'exercer son effort de traction sur la barre d'attelage, il est nécessaire que les roues puissent prendre appui sur les rouleaux comme elles le font en marche normale sur les rails et, pour cela, que les rouleaux soient freinés. Les rouleaux sur lesquels reposent les essieux moteurs de la locomotive sont donc chacun accouplés à un frein hydraulique *Froude*. La manœuvre conjuguée des vannes d'entrée et de sortie d'eau de chaque frein permet de faire varier la puissance absorbée par le frein et, par conséquent, de régler la vitesse de la locomotive. Chaque frein peut absorber une puissance de 1 800 ch (1 300 kW) à 150 km/h.

La station d'essais dispose de six freins ; on peut donc essayer des machines à six essieux moteurs. La machine arrive sur le banc d'essais sans le tender et par ses propres moyens, en roulant par le boudin des roues dans l'ornière des deux poutrelles de la plate-forme élévatoire. Cette plate-forme élévatoire, placée entre les rouleaux, est abaissée lorsque la machine est attelée de manière à faire reposer les roues sur les rouleaux. Un dynamomètre hydraulique est interposé entre la partie arrière de la barre d'attelage et le point fixe. Il permet d'enregistrer les efforts de traction de 0 à 450 kN.

La vitesse, la puissance et le travail à la jante de la locomotive sont enregistrés ou calculés mécaniquement au moyen d'appareils différentiateurs et intégrateurs. Leurs valeurs, ainsi que celles de l'effort de traction, les temps et les kilomètres fictivement parcourus, sont enregistrés d'une manière continue sur une table spéciale. Les pressions et les températures dans les différents circuits de gaz et de vapeur sont enregistrées électriquement. L'ensemble de ces appareils permet l'enregistrement de 24 températures et 18 pressions différentes toutes les minutes.

Les essais exécutés sur les locomotives sont les suivants :

1° *Les essais dynamométriques*, qui permettent de déterminer les puissances à la jante en fonction de la vitesse pour différentes conditions de vitesse et de pourcentage d'admission.

2° *Les essais de consommation*, pendant lesquels le charbon et l'eau consommés par la locomotive sont soigneusement mesurés, pour servir à déterminer les rendements de chaudière et les consommations du moteur pour différentes conditions de marche.

Ces essais permettent d'établir avec le maximum de précision les courbes caractéristiques d'un type de locomotive ou d'apprécier l'intérêt d'une modification proposée pour une locomotive d'un type ancien.

Notons que les locomotives Diesel peuvent être essayées sur ce banc d'essais qui a également été équipé pour permettre l'essai des locomotives électriques.

Il faut ajouter que ce banc d'essais a été complété par plusieurs bancs et appareils destinés à divers essais (banc d'essais pour essayer les châssis de matériel roulant à la compression sous des efforts de 2 000 kN, machine à essayer les sabots de frein, etc.).

CHAPITRE IV

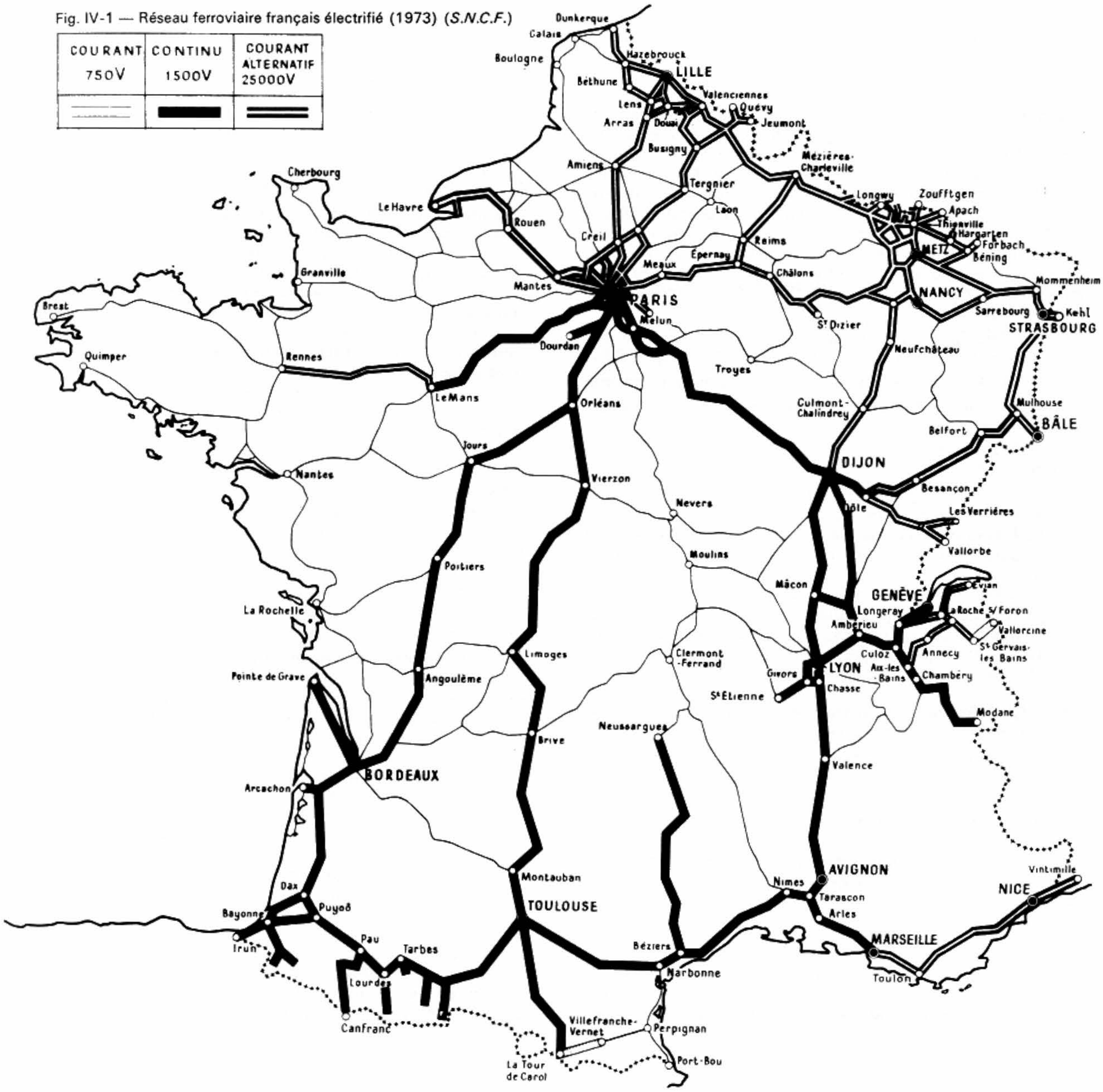
TRACTION ÉLECTRIQUE

1. INTRODUCTION

1.1. Historique. — Entre 1879 (date de la présentation, à l'Exposition universelle de Berlin, du premier chemin de fer électrique construit par Siemens et Halske) et la fin du XIXe siècle, la traction électrique a été surtout appliquée, aussi bien en France qu'à l'étranger, à des lignes urbaines ou suburbaines de faible importance. Leur alimentation était alors assurée en courant continu sous des tensions généralement inférieures à 1 000 V.

Ce n'est pratiquement qu'au début du XXe siècle que les premières électrifications de lignes d'intérêt général furent entreprises tant en Europe qu'aux États-Unis d'Amérique, soit en courant continu sous 600, 1 500 ou 3 000 V, soit en courant alternatif (réseau monophasé ou triphasé) à fréquence spéciale.

Fig. IV-1 — Réseau ferroviaire français électrifié (1973) (*S.N.C.F.*)



En France, la traction électrique à courant continu, sous 600 V, fut mise en exploitation sur de courtes sections de lignes telles que Paris-Austerlitz—Paris-Quai d'Orsay (1900); Saint-Gervais—Chamonix (1901); Paris-Invalides—Versailles rive gauche (1902); Villefranche—Vernet-les-Bains—Bourg-Madame (1902); Paris-Austerlitz—Juvisy (1904). En 1913 la ligne de Perpignan—Villefranche—Vernet-les-Bains fut équipée en courant monophasé à $16\frac{2}{3}$ Hz.

Mais, c'est seulement après la première guerre mondiale que le domaine de l'électrification s'étend aux lignes à grand parcours. De 1920 à la fin de 1938 la traction électrique en courant continu (1,5 kV) a été appliquée à 3 120 km de lignes situées pour la plupart dans la région Sud-Ouest de la S.N.C.F., à l'exception de Paris—Le Mans et Culoz—Modane. Ralentie pendant la deuxième guerre mondiale (seule la section Brive—Montauban fut mise en service en 1943), l'électrification fut reprise activement après les hostilités sur certaines lignes de la région Sud-Est de la S.N.C.F.: Paris—Lyon—Marseille; Lyon—Saint-Étienne; Lyon—Ambérieu; Culoz—Mâcon; Bourg—Ambérieu; Dijon—Dole, etc.

Parallèlement, des études et des essais étaient entrepris par la S.N.C.F. pour l'électrification en courant monophasé à fréquence industrielle qui n'avait pas pu, pour des raisons technologiques, être développée jusqu'alors. La S.N.C.F. n'était pas la seule à étudier l'utilisation de ce courant industriel; des expériences entreprises dès 1930 en Hongrie et en 1936 en Allemagne n'avaient pas permis de dégager des conclusions favorables. À la suite des résultats satisfaisants obtenus sur la ligne Annecy—La Roche-sur-Foron, équipée en 1951 à titre expérimental en courant monophasé à 50 Hz, il fut décidé de retenir définitivement cette technique nettement plus économique que l'électrification en courant continu. Appliquée en première étape dès 1954 et avec un plein succès, sur l'importante ligne Valenciennes—Thionville reliant les bassins miniers du Nord et de Lorraine, elle a été étendue ensuite à de nombreuses lignes des diverses régions de la S.N.C.F. à l'exception du Sud-Ouest.

De ce fait, la France possède un réseau électrifié qui s'étendait sur 9 323 km de lignes au 1er janvier 1974:

— 4 809 km alimentés sous 1,5 kV en courant continu,

— 4 307 km alimentés sous 25 kV en courant monophasé, de fréquence 50 Hz,

— 207 km alimentés sous 750 à 850 volts en courant continu.

La figure IV-1 (page précédente) montre la configuration du réseau ferroviaire français électrifié.

Dans les autres pays, la traction électrique s'est surtout développée, comme en France, après la première guerre mondiale.

Le tableau ci-après établi d'après les statistiques de l'Union Internationale des Chemins de Fer, indique pour chacun des réseaux intéressés, la longueur totale des lignes et le pourcentage des lignes électrifiées et le pourcentage du trafic assuré sur celles-ci au 1er août 1973.

Lignes électrifiées des principaux pays d'Europe
(1er août 1973)

	Longueur totale (km)	Pourcentage du réseau	Pourcentage du trafic
Allemagne (D.B.)	9 362	32	78
Allemagne (D.R.)	1 376	9,3	20
Autriche (Ö.B.B.)	2 403	40,6	82
Belgique (S.N.C.B.)	1 249	29,2	52,9
Bulgarie (B.D.Z.)	891	23,4	39
Danemark (D.S.B.)	84	3,5	14
Espagne (R.E.N.F.E.)	3 284	24	49
Finlande (V.R.)	109	1,8	0,2
France (S.N.C.F.)	9 356	26,6	78
Grande-Bretagne (B.R.)	3 240	16,5	40
Hongrie (M.A.V.)	1 008	12,7	41,5
Italie (F.S.)	7 961	49,4	92
Luxembourg (C.F.L.)	136	41,5	45
Norvège (N.S.B.)	2 440	57,5	77
Pays-Bas (N.S.)	1 646	52,2	76
Pologne P.K.P.)	4 350	16,5	49,5
Portugal (CP + Estoril)	441	15,6	43
Roumanie (C.F.R.)	467	4,7	37
Suède (S.J.)	7 042	64,5	96
Suisse (C.F.F.-B.L.S.)	3 087	99,8	100
Tchécoslovaquie (C.S.D.)	2 390	18	57,5
Turquie (T.C.D.D.)*	108	1,3	3
Yougoslavie (J.Z.)	1 899	18,3	38,3
U.R.S.S. (S.Z.D.)*	36 500	26,6	51

* Y compris la partie asiatique des réseaux.

1.2. Intérêt de la traction électrique.

1.2. Intérêt de la traction électrique. — Elle présente de nombreux avantages:

— Meilleure propreté pour l'usager et l'environnement du chemin de fer.

— Absence de pollution de l'air et d'odeurs désagréables dans les gares et dans les tunnels. Ce point est très important pour les longs souterrains et c'est une des raisons pour lesquelles tous les tunnels transalpins sont électrifiés.

— Amélioration des conditions de travail du personnel de conduite.

— Meilleure utilisation du matériel qui exige fort peu d'immobilisation pour son entretien.

— Possibilité de construire des engins moteurs présentant une puissance spécifique (kilowatt à la jante par tonne de locomotive) très grande permettant de résoudre tous les problèmes de traction difficiles: traction de trains très lourds, franchissement de longues et fortes rampes, circulation à très grande vitesse, service de banlieue à arrêts fréquents et démarrages avec grande accélération.

— Possibilité de surcharge des moteurs de traction. La puissance d'un moteur électrique étant limitée par son échauffement, en mettant à profit l'inertie thermique du moteur il est possible de lui faire développer sans inconvénient, au cours d'un démarrage ou de la montée d'une rampe, un effort de traction supérieur à celui correspondant à sa puissance nominale.

— Possibilité de freinage dynamique, c'est-à-dire de faire fonctionner les moteurs de traction en génératrices débitant sur des résistances (freinage rhéostatique) ou en renvoyant de l'énergie dans la ligne (freinage par récupération). Ces deux modes de freinage sont particulièrement intéressants pour limiter la vitesse lors de la descente des longues pentes et pour l'arrêt des trains circulant à très grande vitesse car ils permettent d'éviter l'application des sabots de frein sur les roues donc l'usure de ceux-ci et les risques de détérioration des roues.

— Insensibilité à l'altitude, les performances de traction ne sont pas affectées par la diminution de la pression atmosphérique sur les lignes à haute altitude.

1.2.1. Intérêt économique. — La traction électrique conduit à des dépenses directes de traction (énergie, conduite et entretien des engins) inférieures à celles de la traction à vapeur et de la traction à moteur thermique. Mais la comparaison économique doit faire intervenir les dépenses de surveillance et d'entretien des installations fixes nécessaires à la traction électrique, les charges d'intérêt et d'amortissement du capital afférent au coût du matériel moteur et des installations fixes le cas échéant.

La figure IV-2 (page suivante) permet d'expliciter la notion de seuil de rentabilité. En ordonnées figure l'ensemble des dépenses annuelles d'exploitation et des charges de capital, et en abscisses la densité de trafic exprimée en consommation d'énergie par kilomètre de ligne et par an.

En traction autonome, vapeur ou diesel, il y a fort peu d'installations fixes et le prix du parc moteur de même que les dépenses annuelles d'exploitation sont sensiblement proportionnels au trafic. Les droites représentatives de ces modes de traction passent donc par l'origine des coordonnées.

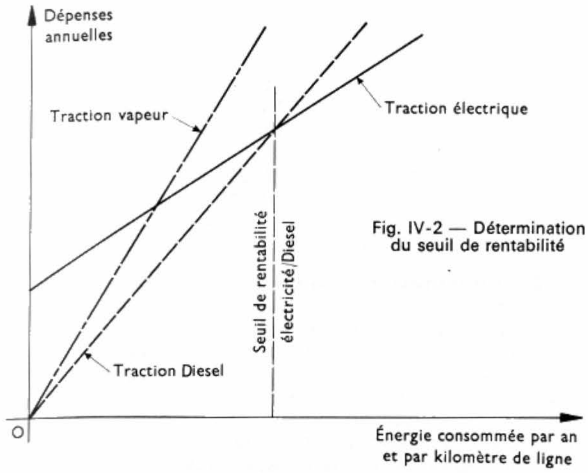


Fig. IV-2 — Détermination du seuil de rentabilité

En traction électrique, les dépenses afférentes aux installations fixes (lignes H.T., sous-stations, caténaires, travaux connexes) restent importantes même pour un trafic faible. Pour un système d'alimentation déterminé, il apparaît donc une certaine ordonnée à l'origine qui représente les charges de capital, de surveillance et d'entretien des installations fixes indépendantes du trafic. En revanche, les dépenses proportionnelles au trafic étant inférieures, malgré le léger supplément d'installations fixes qui devient nécessaire lorsque le trafic s'accroît, le coefficient angulaire de la droite représentative est plus faible que pour les autres modes de traction.

Les droites se coupent pour un certain trafic au-dessus duquel la traction électrique est moins coûteuse que les autres modes de traction et, au-delà de ce seuil, la rentabilité augmente avec le trafic. C'est pourquoi l'électrification porte de préférence sur les lignes à fort trafic.

Pour abaisser le seuil de trafic à partir duquel l'électrification d'une ligne devient rentable, il convient de réduire l'ordonnée à l'origine de la droite représentative du système considéré. C'est ce qui a été réalisé en France avec la traction à courant monophasé à fréquence industrielle avec laquelle les dépenses d'investissement des installations fixes furent considérablement réduites par rapport à celles nécessaires pour l'alimentation en courant continu sous 1,5 kV (fig. V-3).

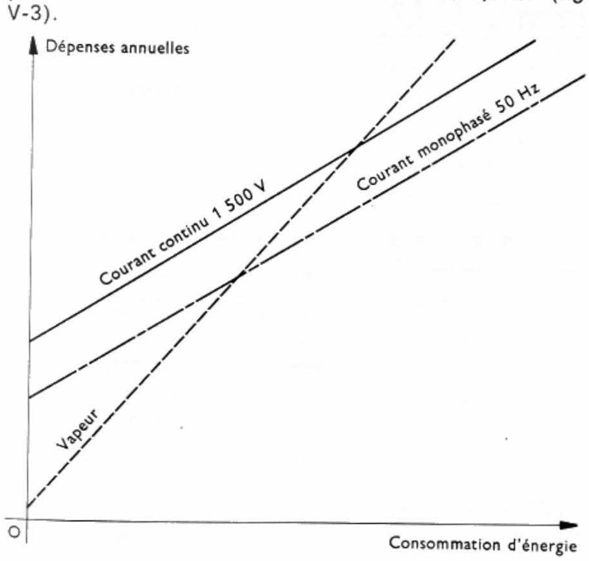


Fig. IV-3 — Comparaison des dépenses annuelles y compris les charges de capital (voie double)

Lorsqu'il s'agit de décider du mode de traction moderne à retenir pour une ligne dont le trafic se situe au voisinage du seuil de partage entre traction Diesel et traction électrique, la comparaison devient plus délicate et demande davantage de précision. Pour tenir compte de l'évolution des prix de l'énergie, de la main-d'œuvre et des matières premières, le bilan est alors établi pour chacun des modes de traction pour la période des vingt années qui suivent la mise en service de la modernisation par une méthode d'actualisation basée sur l'évolution prévue du trafic et des prix pendant la période considérée.

L'actualisation consiste à remplacer les dépenses à effectuer dans le futur par une seule dépense équivalente à effectuer à une date déterminée. Une dépense D_n à faire à l'année n est équivalente aujourd'hui à une dépense D telle que $D = \dfrac{D_n}{(1+i)\,n}$ pour un taux d'actualisation i constant.

L'interprétation des résultats se fait en représentant graphiquement la variation des dépenses actualisées pour chacun des systèmes en fonction du taux d'actualisation c'est-à-dire du taux d'intérêt du capital, comme le montre la figure IV-4.

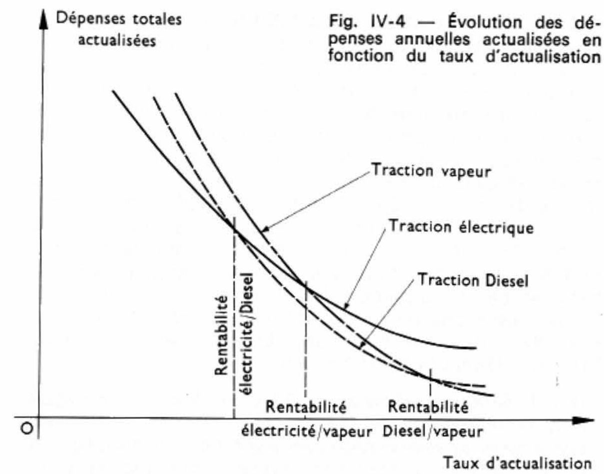


Fig. IV-4 — Évolution des dépenses annuelles actualisées en fonction du taux d'actualisation

1.2.2. Intérêt énergétique. — Une dépense d'énergie de 1 kWh en haute tension en traction électrique équivaut sensiblement à une consommation de charbon de 2 kg en traction vapeur. Compte tenu de la part d'énergie électrique produite par les centrales hydrauliques brûlant des bas produits et des gaz de hauts fourneaux, il suffit de brûler 96 kg de combustible dans une centrale thermique pour développer avec une locomotive électrique le même travail mécanique qu'une locomotive à vapeur consommant une tonne de charbon. L'électrification procure donc une très substantielle économie de combustible primaire.

2. DIFFÉRENTS SYSTÈMES D'ÉLECTRIFICATION

Les différents systèmes d'électrification se distinguent entre eux par les caractéristiques de l'alimentation des engins moteurs :

- alimentation continue sous 550 à 850 V, 1,5 kV ou 3 kV,
- alimentation monophasée à fréquence spéciale,
- alimentation monophasée à fréquence industrielle,
- alimentation triphasée.

De plus, il existe des engins moteurs électriques autonomes alimentés en énergie au moyen de batteries d'accumulateurs. La République fédérale allemande, notamment, utilise des automotrices ainsi équipées pour assurer le transport des voyageurs sur des lignes où les conditions de service sont compatibles avec les sujétions inhérentes à la recharge des batteries d'accumulateurs.

2.1. Alimentation continue. — Les caractéristiques du moteur série à courant continu, bien adaptées à la traction, sont à l'origine du développement des systèmes à courant de cette nature. Ceux-ci nécessitent des sous-stations assez compliquées pour produire ce courant continu à partir de l'énergie fournie par un réseau alternatif haute tension. De plus, les tensions relativement faibles sous lesquelles on doit produire le courant continu impliquent des conducteurs d'alimentation des engins moteurs (caténaires ou troisième rail) de forte section, les intensités des courants étant très grandes.

2.1.1. Alimentation sous 550-850 V. — Ce système qui découle directement des réseaux urbains (tramways et métropolitain) n'appartient pas à proprement parler à la « grande traction moderne » car il conduit à de forts courants pour des puissances importantes et par conséquent à des chutes de tension excessives entraînant des pertes en ligne inacceptables.

En France, ce système se rencontre sur des lignes de montagne telles que Saint-Gervais-les-Bains-Le Fayet—Vallorcine—Villefranche, Vernet-les-Bains—La Tour de Carol et aussi sur certaines lignes de la banlieue parisienne comme Paris-Versailles et Paris-Saint-Germain. À noter qu'en Grande-Bretagne il est utilisé sur des lignes importantes du sud du pays. Dans tous les exemples qui précèdent, l'alimentation en énergie est assurée par un troisième rail de forte section, ce qui permet de limiter les pertes en ligne.

2.1.2. Alimentation sous 1,5 kV. — Ce système a été développé en France après la première guerre mondiale. À la suite des conclusions d'une commission d'étude chargée d'examiner les différents projets d'électrification des réseaux français à la lumière des installations déjà réalisées à cette époque tant en Europe qu'aux États-Unis d'Amérique, la tension de 1,5 kV a été retenue pour la France et celle de 3 kV pour ses colonies (décision ministérielle datant de 1920). Ce mode de traction, bien adapté aux conditions de l'époque, conduit aujourd'hui à des chutes de tension en ligne importantes malgré de fortes, sections de conducteur, par suite de l'augmentation du trafic et de la puissance des locomotives modernes. En Europe, ce mode d'alimentation est également utilisé aux Pays-Bas, dans le nord de l'Espagne et en Grande-Bretagne (Manchester-Sheffield).

2.1.3. Alimentation sous 3 kV. — À puissance égale, ce système permet de réduire de moitié la section des conducteurs de distribution par rapport à celle d'un équipement sous 1,5 kV. A contrario il présente certaines sujétions dans la réalisation des moteurs de traction et de groupes auxiliaires. En effet, il est nécessaire que leur isolation soit réalisée pour la tension de service de 3 kV, et, par ailleurs, des impératifs techniques s'opposent à la réalisation d'un moteur fonctionnant sous cette tension. Cela oblige à utiliser soit deux moteurs 1,5 kV couplés en série, soit un moteur unique dont l'induit comporte deux bobinages et deux collecteurs 1,5 kV couplés en série.

C'est néanmoins le plus développé des systèmes à courant continu. Il est exploité dans les pays suivants : Belgique, Espagne, Italie, Luxembourg, Algérie, Tunisie, Maroc, Pologne, Tchécoslovaquie, Yougoslavie, U.R.S.S.

2.2. Alimentation monophasée. — Dans les systèmes avec alimentation monophasée, les sous-stations se réduisent en principe à de simples postes de transformation. De plus, la possibilité d'utiliser des tensions élevées permet d'employer des conducteurs de distribution de section plus faible que ceux des équipements à courant continu. Toutefois, la commutation du moteur série à collecteur alimenté en courant alternatif présente de sérieuses sujétions et pendant longtemps il a été indispensable, pour arriver à un compromis acceptable, de recourir à une fréquence spéciale plus faible que la fréquence industrielle (25 ou $16\frac{2}{3}$ Hz). Par la suite, des moteurs de traction fonctionnant à la fréquence industrielle ont été construits mais en même temps les progrès de l'électrotechnique facilitaient l'installation de redresseurs à bord des locomotives, permettant ainsi de concilier les avantages de la distribution d'énergie à fréquence industrielle avec les qualités du moteur à courant continu.

2.2.1. Alimentation monophasée à fréquence spéciale. — Au début du siècle, des installations de traction à courant alternatif furent réalisées, tant en Europe qu'aux États-Unis d'Amérique, avec des fréquences diverses telles que 42 et 25 Hz qui étaient à l'époque les fréquences normales des réseaux de distribution. Il existe encore outre-Atlantique des réseaux fournissant sous 11 kV un courant de 25 Hz. En Europe, les caractéristiques retenues pour les

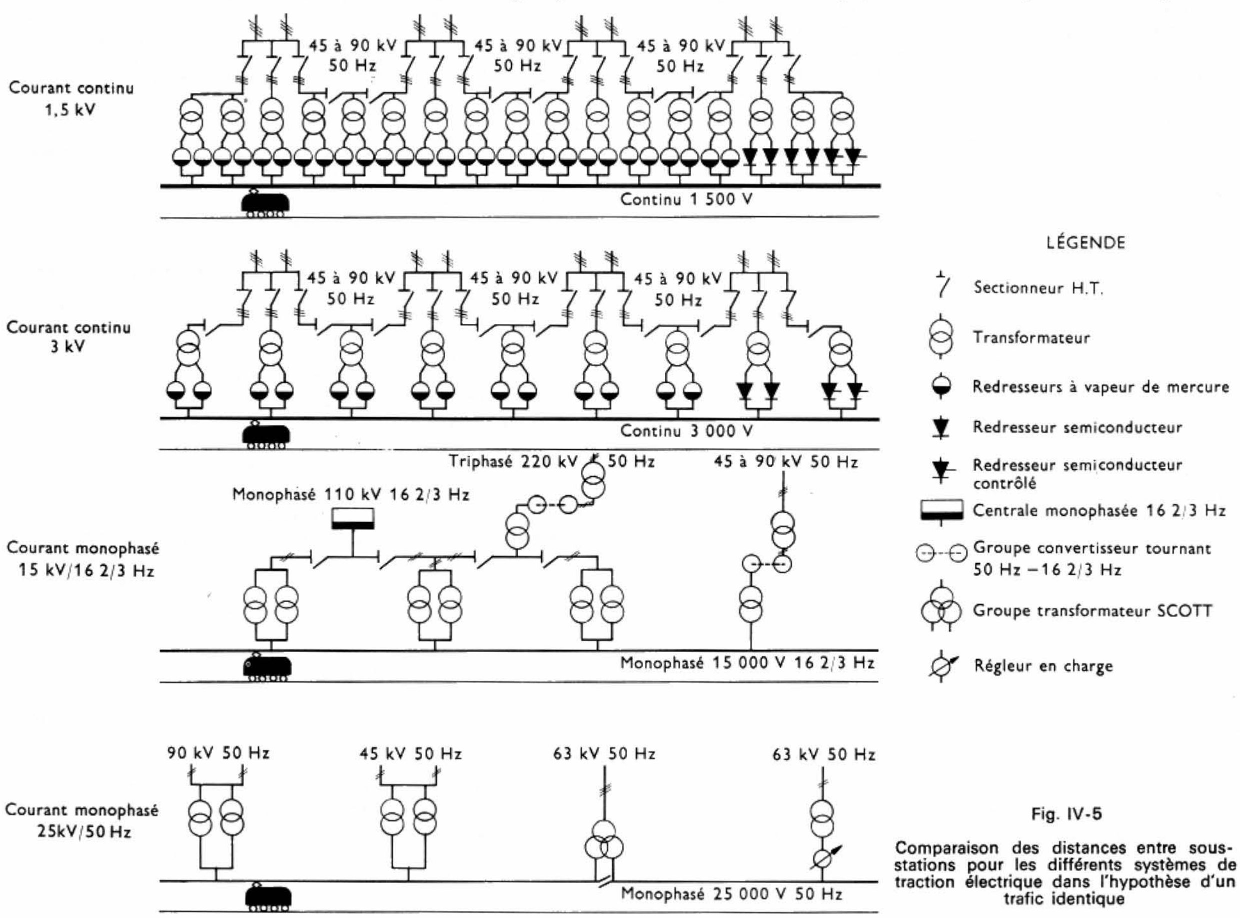


Fig. IV-5

Comparaison des distances entre sous-stations pour les différents systèmes de traction électrique dans l'hypothèse d'un trafic identique

alimentations en courant spécial de traction sont 15 kV et $16\frac{2}{3}$ Hz. On en trouve dans les pays suivants : République fédérale allemande, République démocratique allemande, Autriche, Norvège, Suède, Suisse. En France, ce mode de traction a été exploité sur certaines petites lignes de la région pyrénéenne, reconverties après 1920 en courant continu (1,5 kV) à l'exception de Perpignan—Villefranche—Vernet-les-Bains qui a conservé son équipement d'origine mais dont l'exploitation a été abandonnée récemment.

2.2.2. Alimentation monophasée à fréquence industrielle. — Ce système, le plus moderne, s'est développé intensivement en France depuis 1954 et a été adopté ensuite par de nombreux pays : Bulgarie, Congo, Finlande, Grande-Bretagne, Hongrie, Inde, Luxembourg, Japon, Portugal, République populaire chinoise, Roumanie, Tchécoslovaquie, Turquie, U.R.S.S., Yougoslavie. La technique française a connu en cette matière un rayonnement mondial, notre industrie a livré du matériel de traction à de nombreux pays notamment : Inde, Luxembourg, Portugal, République populaire chinoise, Turquie, U.R.S.S.

Ce mode d'électrification doit son succès aux avantages qu'il présente par rapport aux autres, à savoir :

— Simplicité des sous-stations dont l'organe de puissance se réduit à un transformateur raccordé au réseau national à haute tension. Dans certains cas, il est même possible d'installer ce transformateur dans un poste de distribution du réseau national placé près de la ligne électrifiée.

— Tension d'alimentation élevée des engins moteurs (25 kV) entraînant de faibles pertes dans la caténaire.

— Caténaire de faible section donc légère et économique.

— Possibilité d'un grand espacement entre sous-stations (de 60 à 100 km contre 8 à 25 km pour l'alimentation en courant continu sous 1,5 kV) eu égard aux pertes en lignes réduites. La figure IV-5 établit la comparaison, à une même échelle, des distances entre sous-stations pour les différents systèmes dans l'hypothèse d'un trafic identique.

Comparée à l'alimentation en courant continu (1,5 kV), l'électrification à 25 kV-50 Hz procure une réduction proche de 30 % des dépenses d'investissement afférentes aux installations fixes de traction : sous-stations, caténaires, poste de voie, etc.

2.3. Alimentation triphasée. — Ce système qui permet l'emploi de moteurs d'induction à cage d'écureuil ou à rotor bobiné n'est mentionné que pour mémoire. Après de nombreuses applications d'essais sans suite au début du siècle dans divers pays : Allemagne, Suisse, Italie, États-Unis d'Amérique, il a aujourd'hui presque complètement disparu. En Italie, les lignes qui avaient été électrifiées de cette façon (réseau 3,7 kV-$16\frac{2}{3}$ Hz) ont été ou seront reconverties pour le continu (3 kV).

3. INSTALLATIONS FIXES DE TRACTION

3.1. Alimentation en énergie. — Au début de la traction électrique certains réseaux de chemin de fer furent amenés à construire leurs usines de production d'énergie et leurs lignes de transport, mais actuellement les sous-stations de traction sont, dans le cas le plus fréquent, alimentées par des postes du réseau de transport national.

3.2. Sous-stations de traction à courant continu

3.2.1. Généralités. — Le schéma des sous-stations à courant continu n'est pas influencé, dans son principe, par la tension adoptée pour la ligne de contact. Il comprend toujours (fig. IV-6) un jeu de barres H.T., ou un ou plusieurs groupes de traction (disjoncteur H.T., transformateur, organe de conversion, appareil de coupure), les cellules de départs de voies et un ou deux transformateurs de services auxiliaires.

3.2.2. Transformateurs de traction. — Il s'agit de transformateurs abaisseurs, généralement à enroulements

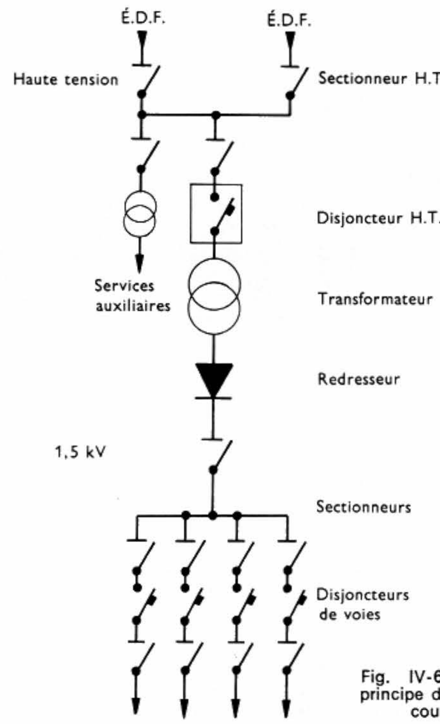


Fig. IV-6 — Schéma de principe d'une sous-station à courant continu

immergés dans l'huile, à refroidissement naturel, dimensionnés pour pouvoir être transportés par voie ferrée sans démontage et présentant certaines particularités constructives :

— calage très soigné des enroulements pour assurer une bonne tenue aux courts-circuits relativement fréquents en traction ;

— circuit magnétique à faibles pertes pour garantir un rendement satisfaisant malgré les longues périodes de fonctionnement à faible charge ;

— schéma de couplage des enroulements particuliers imposés par la structure du convertisseur alimenté ;

— insertion d'un écran statique entre primaire et secondaire, dans le cas de transformateurs alimentant des redresseurs à semiconducteurs, afin de limiter la transmission des surtensions engendrées par la foudre sur le réseau H.T. ;

— dimensionnement adapté à celui du convertisseur alimenté. Par exemple, pour un redresseur à semiconducteurs de classe « grande traction », le cycle de charge fixé par la Commission électrotechnique internationale (C.E.I.) est : 100 % du courant nominal pendant trois heures, puis 150 % pendant deux heures et 300 % pendant une minute.

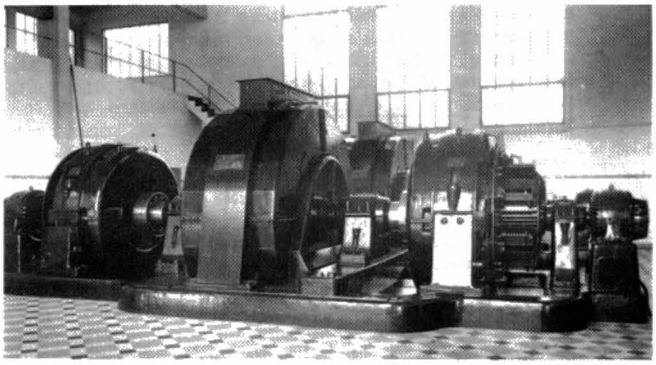
3.2.3. Organes de conversion. — Les organes utilisés pour opérer la conversion du courant alternatif en courant continu se classent, dans l'ordre chronologique, de la manière suivante :

— groupes tournants,
— redresseurs à vapeur de mercure,
— redresseurs à semiconducteurs.

Chaque évolution s'est traduite par une simplification des équipements et une amélioration de leur rendement.

1° *Groupes moteurs-générateurs.* — Constitués d'un moteur synchrone entraînant une ou deux génératrices (V. fig. VI-7), ces groupes onéreux, tant sur le plan de l'installation que de l'entretien, ont été assez peu employés. Ils le furent surtout dans les régions où il était nécessaire de relever le facteur de puissance d'un réseau H.T. en surexcitant le moteur synchrone (V. t. 1, Électrotechnique, chap. 22).

2° *Commutatrice.* — Cette machine présente un rendement meilleur que celui d'un groupe moteur-générateur car l'énergie est transférée d'un réseau sur l'autre sans conversion en énergie mécanique. Elle se prête bien au fonctionnement avec caractéristique *compound* et son caractère de réversibilité lui permet d'absorber éventuellement l'énergie de récupération. Bien que des commuta-



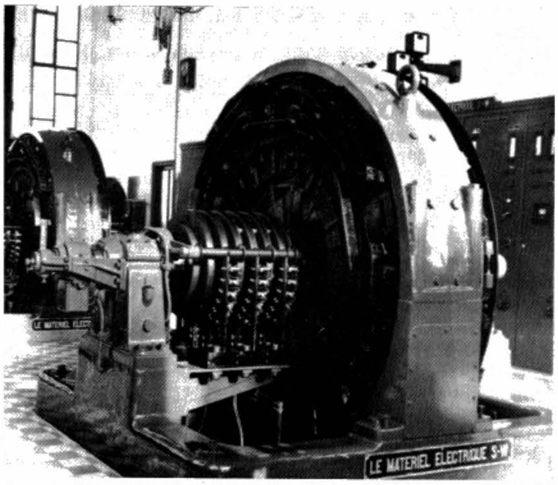


Fig. IV-7 — Ancien groupe S.N.C.F. de 2 000 kW (moteur synchrone entraînant deux génératrices); constructeur Alsthom (*S.N.C.F.*)

Fig. IV-8 — Commutatrices 750 V - 1 000 kW; anciennes sous-stations Paris—Orléans 1925 (*S.N.C.F.*)

trices délivrant une tension de 1,5 kV aient été réalisées, le souci de la sécurité de fonctionnement a souvent conduit à l'utilisation de deux commutatrices 750 V couplées en série (fig. IV-8).

Les commutatrices furent, avant que ne se développent les redresseurs statiques, les convertisseurs les mieux adaptés à la traction. Il n'en a plus été construit en France depuis 1938.

3° *Redresseurs à vapeur de mercure.* — Connus depuis le début du siècle, leur utilisation en traction ne s'est développée qu'à partir de 1920, d'abord sous forme de redresseurs polyanodiques à vide entretenu et à refroidissement par circulation d'eau (fig. IV-9), puis sous forme de redresseurs mono-anodiques à vide définitif et refroidissement par air (fig. IV-10). Le schéma de redressement le plus utilisé est le montage en double étoile triphasée avec bobine médiatrice (fig. IV-11) qui donne une ondulation résultante de fréquence 300 Hz (V. t. 1, Électronique chap. 18).

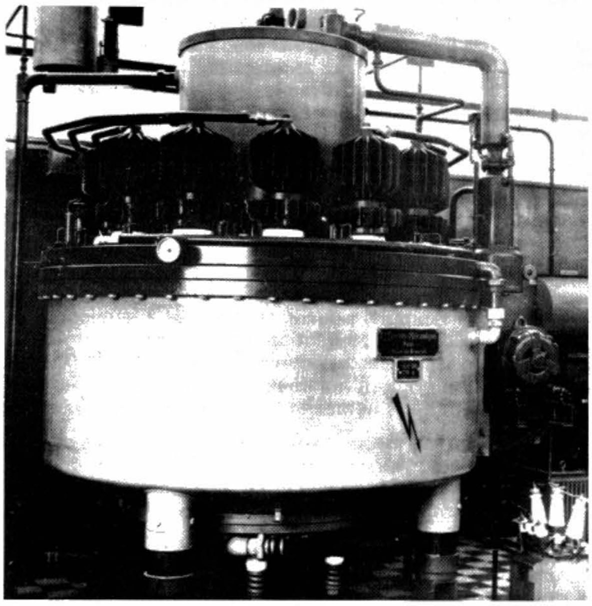


Fig. IV-9 — Redresseur polyanodique; 1,5 kV - 4 000 kW; sous-stations de Paris—Dijon (1950); constructeur CEM (*S.N.C.F.*)

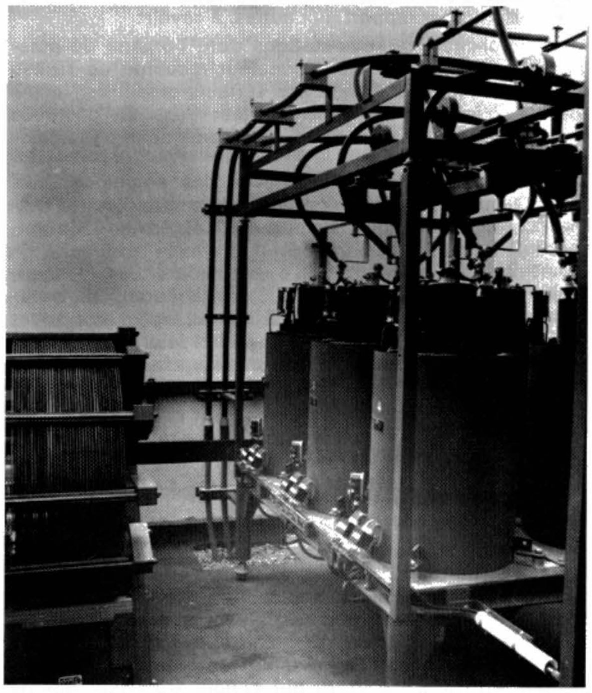


Fig. IV-10 — Redresseurs mono-anodiques pour groupe 1,5 kV - 4 000 kW; sous-stations de Lyon—Marseille (1957); constructeur Jeumont (*S.N.C.F.*)

4° *Redresseurs à diodes au silicium.* — L'avènement des diodes à jonction et plus précisément de celles obtenues à partir de monocristaux de silicium, a provoqué l'abandon des redresseurs à vapeur de mercure. Un redresseur à semi-conducteurs est plus simple à réaliser, n'est pas limité en puissance puisqu'il est possible d'assembler des diodes en parallèle ou en série, ne demande aucun entretien et présente un meilleur rendement qu'un redresseur ionique dans lequel existe toujours une chute de tension d'arc. Les diodes utilisées admettent généralement un courant d'une intensité moyenne de 250 à 500 A et une tension inverse de blocage de 1,8 à 2,5 kV.

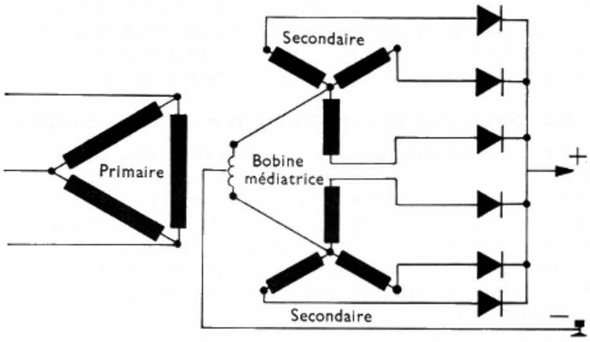


Fig. IV-11 — Schéma de redressement double étoile triphasée

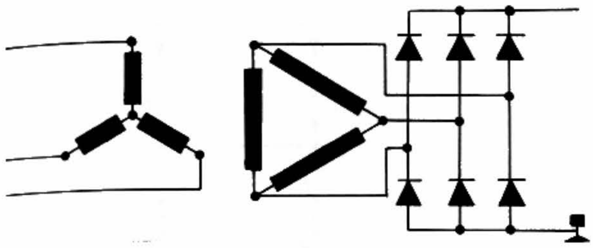


Fig. IV-12 — Schéma de redressement en pont de Graetz triphasé

a) *Schémas de montage :* le schéma de base est le montage en pont de Graetz triphasé (fig. IV-12), qui conduit à un dimensionnement économique du transformateur d'alimentation. Cependant, dans le cas où des lignes aériennes de télécommunications sont proches de la voie, il peut être nécessaire d'adopter des montages plus élaborés pour réduire l'ondulation de la tension caténaire, génératrice de perturbations : ce sont les montages en double pont, branchement série (fig. IV-13) ou parallèle (fig. IV-14).

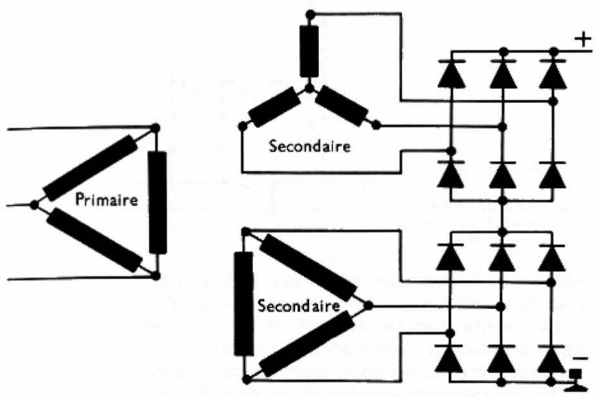


Fig. IV-13 — Schéma de redressement double pont triphasé-série

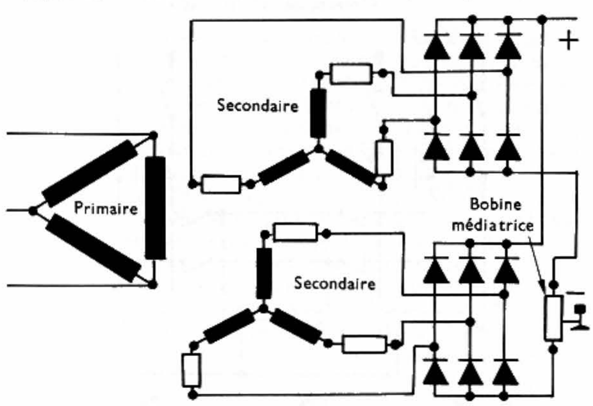


Fig. IV-14 — Schéma de redressement double pont triphasé-parallèle

Ils délivrent une tension ondulée à la fréquence 600 Hz, au lieu de 300 Hz pour un montage simple, et permettent de réduire l'amplitude des harmoniques.

b) *Dimensionnement et protection des redresseurs au silicium :* un redresseur de traction doit comporter suffisamment de diodes en parallèle pour supporter sans dommage les surcharges et les courts-circuits pendant le temps d'intervention des dispositifs de protection. Le nombre de diodes en série est conditionné par la tenue aux surtensions. Différents organes de protection sont prévus pour limiter le niveau de celles-ci :

— éclateurs aux bornes du primaire du transformateur,
— écran métallisé relié à la terre entre enroulements du transformateur,
— circuits résistances-condensateurs aux bornes du redresseur,
— circuit de même type aux bornes de chaque diode,
— parafoudres sur les départs de voies.

5° *Compoundage des redresseurs de traction.* — La caractéristique naturelle d'un redresseur est du type *shunt ;* la tension s'abaisse quand le débit augmente (fig. IV-15). En traction, il est intéressant de disposer de la pleine tension lors des appels de puissance, donc de redresser la caractéristique.

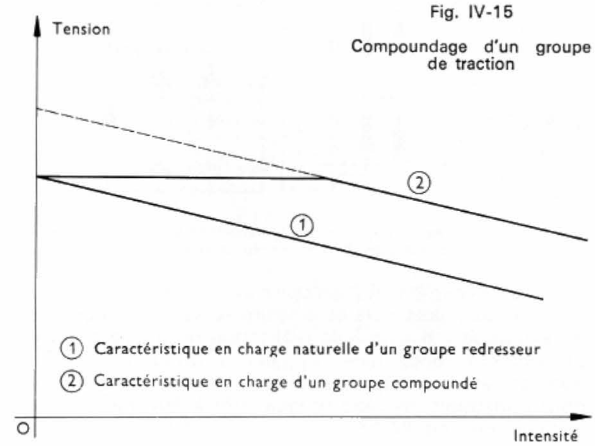


Fig. IV-15

Compoundage d'un groupe de traction

Le compoundage peut être réalisé soit en disposant des réactances autosaturables dans les connexions de phases du redresseur, soit en utilisant des redresseurs à amorçage contrôlé. Dans les deux cas la tension délivrée par le transformateur doit être suffisamment élevée ; le dispositif de compoundage introduit alors dans les commutations un retard variant en sens inverse de la charge, de telle manière que la tension moyenne délivrée reste comprise dans un intervalle déterminé.

a) *Compoundage par réactances autosaturables* (fig. IV-16). — Chaque réactance se présente comme une impédance au moment où le courant tend à s'établir dans un bras du redresseur, puis se sature et devient alors équivalente à une résistance faible. Un enroulement de prémagnétisation et un enroulement de commande permettent de déplacer l'instant de saturation en fonction du débit. Cette solution met en œuvre du matériel robuste et n'exige pas de réglage délicat. Cependant, l'appareillage est volumineux et augmente les pertes à vide du groupe.

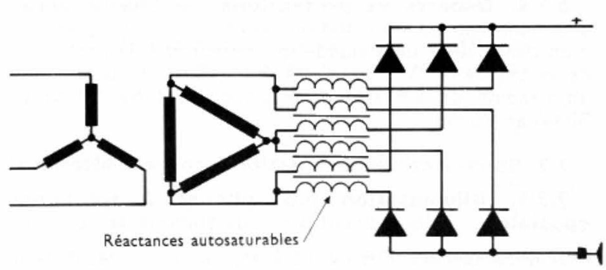


Fig. IV-16 — Montage en pont de Graetz triphasé avec compoundage par réactances autosaturables

b) *Compoundage par redresseurs contrôlés.* — Les redresseurs à vapeur de mercure se prêtent au réglage de tension par application d'une polarisation négative sur la grille écran d'anode ; la tension délivrée varie alors comme le cosinus de l'angle de retard. Le même résultat peut être obtenu avec un redresseur au silicium dans lequel les diodes sont remplacées par des thyristors mais cette solution est très onéreuse en raison du prix élevé des thyristors.

c) *Compoundage par groupe survolteur à thyristors* (V. fig. IV-17). — Cette solution se prête bien à l'adjonction d'un compoundage sur un groupe déjà en service ; elle a de plus l'intérêt de moins déformer la tension que les solutions précédentes et par conséquent de réduire notablement les taux d'harmoniques. Le pont survolteur pouvant être inséré côté négatif, et la tension ajoutée étant au maximum de 200 V, les thyristors ne sont soumis qu'à des contraintes très réduites.

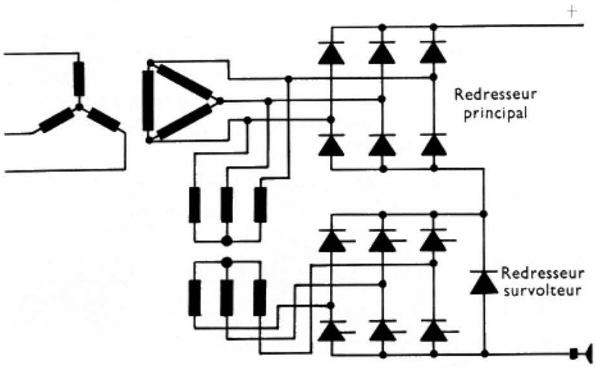


Fig. IV-17 — Compoundage d'un groupe monté en pont de Graetz par adjonction d'un survolteur à thyristors

6° *Évolution des groupes de conversion.* — L'avènement des redresseurs au silicium et les progrès de l'électrotechnique ont permis la réalisation de groupes convertisseurs compacts dans lesquels le disjoncteur H.T., le transformateur et les redresseurs sont assemblés en usine pour constituer un bloc unique prêt à être raccordé aux installations (fig. IV-18).

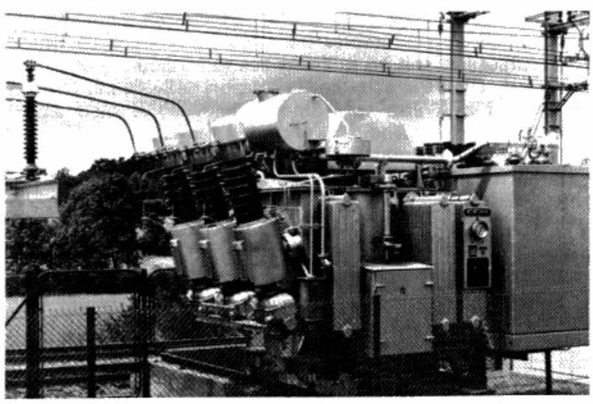


Fig. IV-18 — Groupe compact (*S.N.C.F.*)

3.2.4. Départs et protections. — Chaque départ d'alimentation de sous-station vers la caténaire est équipé d'un disjoncteur ultra-rapide qui concourt à la protection de la caténaire (V. ci-après § 3.4.1, 3°). Un disjoncteur ultra-rapide de 1,5 kV coupe un courant de défaut de 50 kA en 20 ms.

3.3. Sous-stations de traction à courant alternatif

3.3.1. Alimentation monophasée à fréquence spéciale. — L'équipement des sous-stations de traction à fréquence spéciale (15 kV-16 $\frac{2}{3}$ Hz, par exemple) dépend de leurs conditions d'alimentation :

— Si elles sont attenantes à des centrales autonomes de production ou alimentées par une ligne H.T. à fréquence spéciale, l'équipement se limite à des transformateurs et à des appareils de protection.

— Si elles sont alimentées par le réseau national elles doivent assurer la conversion de fréquence. Dans ce cas, chaque unité comprend :

- un transformateur triphasé abaisseur de tension,
- un moteur synchrone triphasé entraînant un alternateur monophasé,
- un transformateur monophasé élévateur,
- des appareils de coupure et de protection.

3.3.2. Alimentation monophasée à fréquence industrielle

1° *Équipement des sous-stations.* — L'équipement des sous-stations se limite à des transformateurs abaisseurs et à des appareils de coupure et de protection (fig. IV-19). Celles-ci sont généralement raccordées au

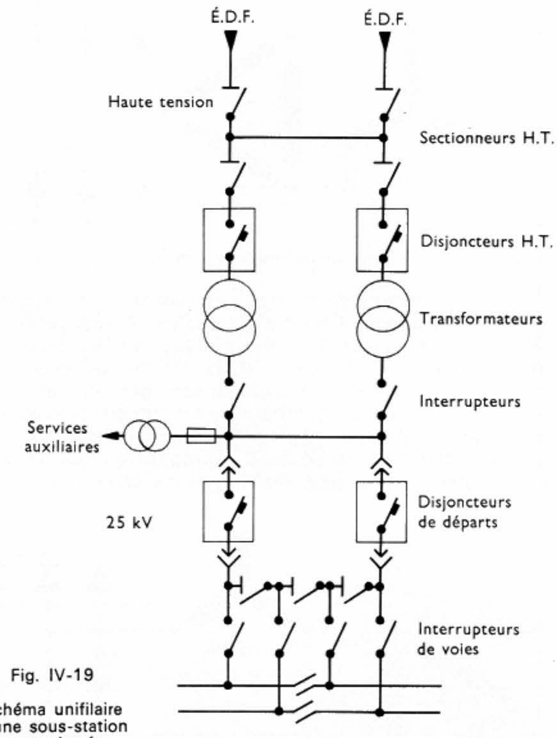
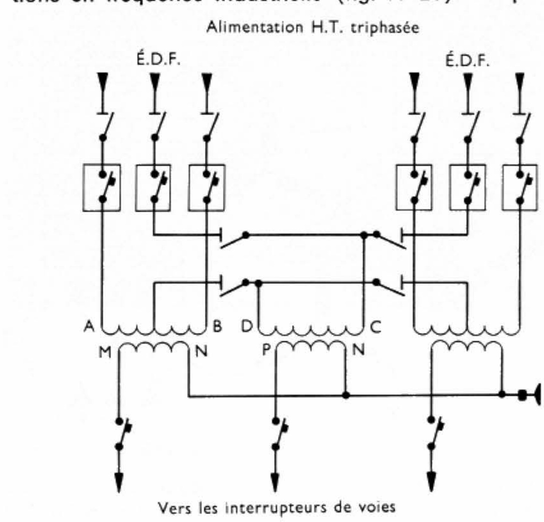


Fig. IV-19

Schéma unifilaire d'une sous-station monophasée

réseau H.T. national par deux lignes monophasées distinctes afin d'assurer la permanence de l'alimentation.

La crainte que cette jonction monophasée ne déséquilibre le réseau d'alimentation a conduit à adopter des montages Scott pour les sous-stations des premières électrifications en fréquence industrielle (fig. IV-20). L'expérience



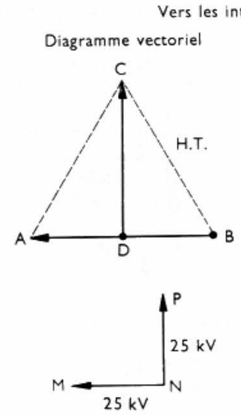


Fig. IV-20

Schéma de principe d'une sous-station type Scott : 2 transformateurs sont utilisables pour obtenir la tension u_{MN} (représentée par le vecteur $\overrightarrow{NM}$) (dont 1 de réserve) ; un seul transformateur est prévu pour obtenir la tension u_{PN} (représentée par le vecteur $\overrightarrow{NP}$). V. t. 1, Électrotechnique, chap. 8

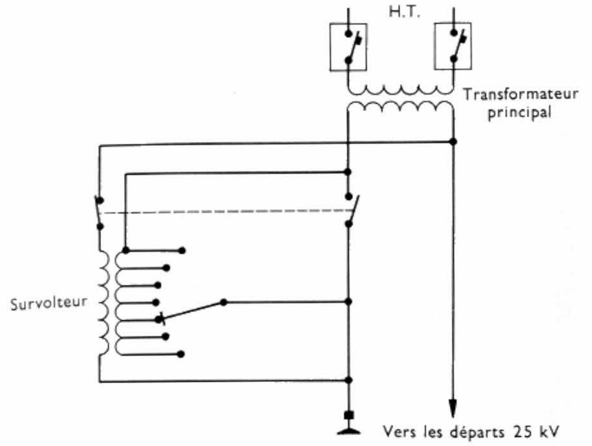


Fig. IV-21 a — Schéma de principe du réglage de tension en charge

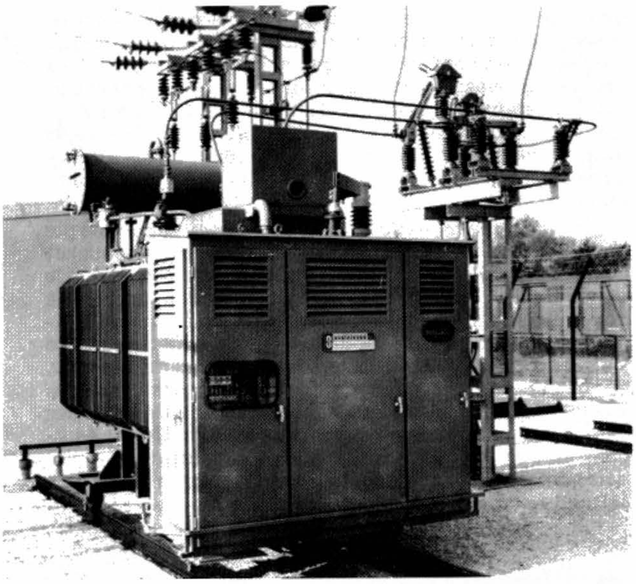


Fig. IV-21 b — Régleur en charge de sous-station monophasée; constructeur Savoisienne (*S.N.C.F.*)

a prouvé que cette précaution était inutile : il suffit que la charge monophasée soit inférieure à 3 % (ou 5 % en pointe) de la puissance de court-circuit du réseau au point de raccordement, pour que le déséquilibre soit sans conséquences. Cette condition est toujours remplie dans les pays industrialisés et c'est ainsi que la soixantaine de sous-stations alimentant les 4 000 km de lignes de la S.N.C.F. électrifiées en 25 kV-50 Hz est de type monophasé pur.

L'adoption d'un schéma monophasé pur autorise la mise en œuvre des deux moyens permettant de réduire la chute de tension en ligne ou, pour une même tolérance de tension, d'espacer davantage les sous-stations : ce sont le réglage en charge de la tension 25 kV et la mise en parallèle des sous-stations par la caténaire. Employés simultanément, ils permettent pratiquement de doubler l'espacement en double voie.

La mise en parallèle, qui consiste à shunter les sectionnements entre sous-stations, implique que celles-ci soient alimentées par les mêmes phases H.T. Il est aussi nécessaire d'installer une protection H.T. à retour de courant, afin qu'en cas de déclenchement d'une ligne H.T., celle-ci ne soit pas réalimentée en monophasé par la caténaire ; un relais de mesure de déphasage assure cette fonction.

Le réglage en charge a pour but de compenser les chutes de tension provoquées dans les transformateurs et leurs lignes d'alimentation par les appels de courant. Le résultat est atteint en insérant en série avec le transformateur principal l'enroulement secondaire d'un transformateur survolteur à tension variable (fig. IV-21 a et b).

Deux types de régleurs sont en service à la S.N.C.F. Le plus ancien met en œuvre un graduateur électromécanique et procède aux changements de prises par le jeu de contacteurs. Le second est doté de commutateurs à thyristors, couvrant le déplacement de contacts tournants rapides. Les deux versions réalisent un réglage discret de la tension, par crans de 300 V sur une plage de 5 000 V. Les manœuvres sont commandées par des logiques électroniques ou à relais en fonction de l'écart de tension par rapport à une valeur de référence.

2° *Départs et protections.* — Les sous-stations sont équipées de disjoncteurs avec relais de protection pour chacune des deux directions. Ces disjoncteurs assurent tous la protection des lignes. En effet, la détection d'un défaut sur caténaire monophasée ne peut pas être fondée sur une mesure d'intensité car le courant appelé lors d'un court-circuit éloigné de la sous-station est inférieur à celui d'une charge normale. Il est donc nécessaire de mesurer le déphasage du courant sur la tension, c'est-à-dire l'argument de l'impédance de la caténaire : celui-ci est voisin de 70 degrés lors d'un court-circuit alors qu'il n'atteint que 35 degrés environ en service normal.

La S.N.C.F. a ainsi utilisé, dans les sous-stations, des relais de protection dits d'*admittance* dont la caractéristique était d'abord un cercle, puis des relais à caractéristique elliptique qui sont mieux adaptés aux très fortes puissances. Les premiers, réglés à une valeur proche de celle du déphasage du courant sur la tension pour le cas d'un défaut supposé à l'extrémité de la ligne, étaient doublés par des relais à *maximum d'intensité*, intervenant en cas de défaut proche de la sous-station. En revanche, les seconds, efficaces même en cas de défauts survenant au voisinage de la sous-station, se suffisent à eux-mêmes (V. t. 2, Relais).

3.3.3. Alimentation triphasée. — Les sous-stations sont comparables à celles installées en électrification monophasée avec les deux variantes : fréquence spéciale imposant des convertisseurs ou fréquence industrielle permettant de se limiter à des transformateurs. Dans les deux cas les lignes électrifiées sont alimentées par des centrales de production délivrant directement l'énergie sous la forme utilisable par les locomotives.

3.4. Installations de distribution de l'énergie aux engins moteurs

3.4.1. Alimentation en courant continu. — L'alimentation des engins moteurs en énergie est assurée, à partir des sous-stations, par une ligne de contact constituée soit par un rail isolé, ou troisième rail parallèle aux rails de roulement, soit par un conducteur aérien ou caténaire. Le circuit de retour est constitué par les rails.

1° *Rail isolé ou troisième rail.* — Le troisième rail est un conducteur en acier, placé latéralement aux rails de roulement, et supporté par des isolateurs en grès ou en bois paraffiné (fig. IV-22). Assez répandu au début de l'élec-

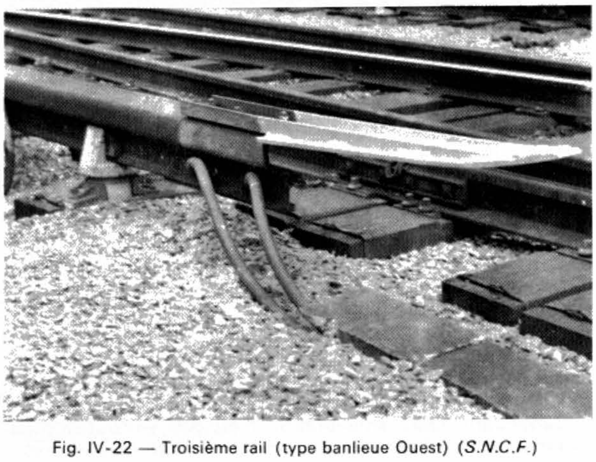


Fig. IV-22 — Troisième rail (type banlieue Ouest) (*S.N.C.F.*)

trification, le troisième rail est actuellement abandonné en raison de ses inconvénients : encombrement des plates-formes, notamment dans les gares, interruption totale aux passages à niveau (ce qui nécessite la présence de plusieurs frotteurs en prise), risques d'électrocution, captage défectueux du courant au-delà de 120 km/h, etc. Aussi ne le trouve-t-on plus en France que sur quelques lignes à 750 V de banlieue et de montagne, et sur la ligne à 1,5 kV Chambéry-Modane.

2° *Caténaire.* — Cette ligne de contact, supportée par des poteaux distants de 30 à 60 m environ, est essentiellement constituée d'un fil porteur auquel sont suspendus le ou les fils de contact. Au niveau du fil de contact, elle ne doit pas se déformer de façon sensible au passage du pantographe. Or, lorsqu'elle est limitée à un seul fil tendu entre les supports, sa flexibilité est grande au milieu de la portée, et nulle au droit des points de fixation qui constituent des « points durs », générateurs de chocs et de décollements des pantographes au-delà d'une certaine vitesse. Un tel équipement, appelé *fil tramway* (fig. IV-23), n'est donc utilisé que pour des voies de gare, ou de triage, où la circulation est toujours lente.

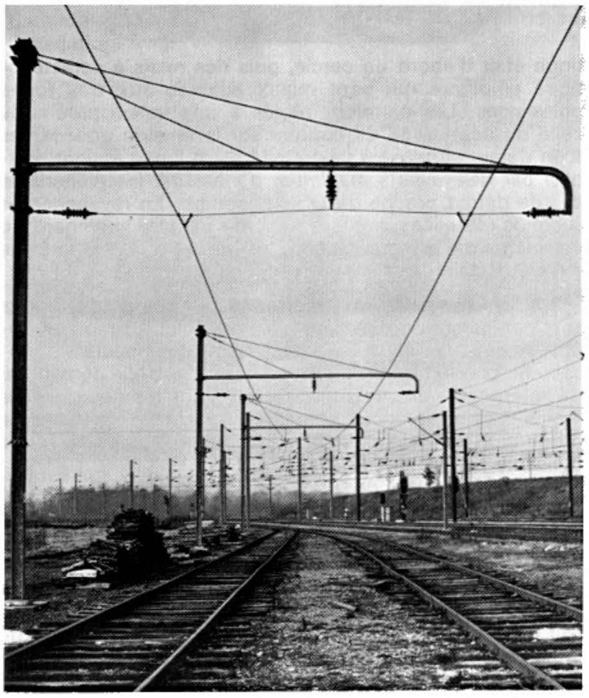


Fig. IV-23 — Ligne à suspension simple ou « fil tramway » (*S.N.C.F.*)

Pour régulariser la flexibilité du fil de contact, celui-ci est suspendu à un câble porteur au moyen de pendules de longueur variable : c'est la suspension *caténaire simple* (fig. IV-24). Ainsi, la flexibilité est diminuée au milieu de la

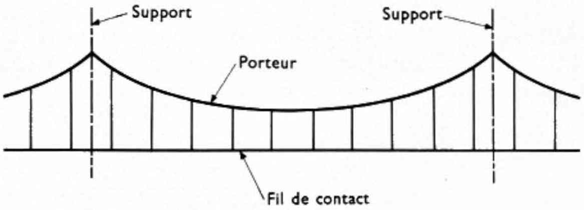


Fig. IV-24 — Caténaire simple

portée par augmentation de la masse de l'ensemble ; au contraire elle conserve une certaine valeur au droit des supports grâce à l'utilisation de pendules judicieusement répartis coulissant verticalement.

Cependant, cette amélioration n'est pas suffisante pour obtenir un bon captage du courant aux grandes vitesses.

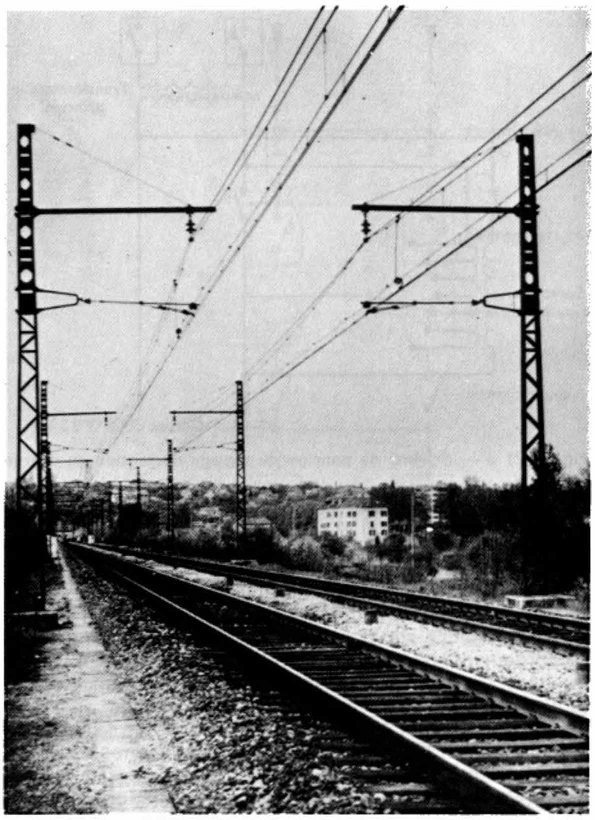


Fig. IV-25 — Caténaire « compound » (*S.N.C.F.*)

La disposition adoptée dans ce cas, appelée *caténaire composée* ou *compound*, comporte (fig. IV-25) :

— un porteur principal, généralement en bronze,
— un porteur auxiliaire, en cuivre,
— un ou deux fils de contact, également en cuivre.

Au moyen de pendules le porteur principal maintient le porteur auxiliaire horizontal. Les fils de contact sont suspendus au porteur auxiliaire par des étriers à griffes qui supportent alternativement l'un ou l'autre fil. Ces derniers sont désaxés périodiquement par rapport à la voie, afin que le contact ne s'établisse pas toujours en un même point de l'archet du pantographe.

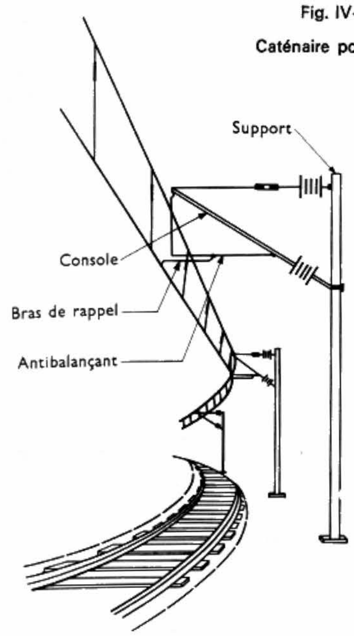
Il existe deux dispositions différentes d'accrochage du porteur et du fil de contact.

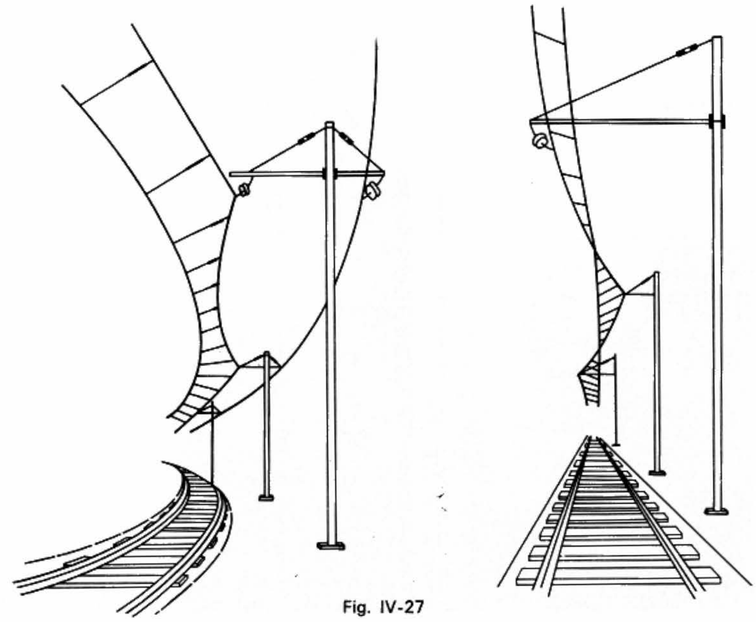
Dans l'une, le porteur principal, fixé sur les consoles, et les fils de contacts, maintenus en position au moyen d'*antibalançants* et de *bras de rappel*, restent sensiblement dans un même plan vertical (V. fig. IV-26). En courbe, la caténaire se place donc dans une succession de plans verticaux dont la projection horizontale forme les côtés d'un polygone, d'où le nom de *caténaire polygonale*.

Dans l'autre, il n'y a pas d'antibalançants et le fil de contact unique n'est maintenu que par les pendules fixés au fil porteur. La position du fil de contact dépend alors du tracé de la voie. En courbe, il est sollicité vers le centre et, suivant la longueur des pendules, décrit une ligne qui est sensiblement à la verticale de l'axe de la voie (V. fig. IV-27). En alignement, la position du fil porteur varie périodiquement sur les consoles, de telle sorte que l'ensemble de la caténaire forme une surface gauche inclinée d'un côté et de l'autre, le fil de contact décrivant une sinusoïde. Cette caténaire se présente donc dans l'espace comme une surface gauche, plus ou moins inclinée, d'où son nom de *caténaire gauche* ou *caténaire ondulée* (lignes de l'ex-réseau du Midi). Son principal avantage est de ne présenter aucun point dur sur le fil de contact, mais elle ne peut convenir qu'à un ensemble relativement léger et elle est difficile à installer et à entretenir. Aussi est-elle peu à peu abandonnée, au profit de la caténaire polygonale à deux fils de contact d'un entretien plus aisé.

Fig. IV-26

Caténaire polygonale





En courbe

Fig. IV-27

Caténaire ondulée

En alignement

Les très grandes intensités des courants dans les lignes à trafic important nécessitent des lignes caténaires à forte section de cuivre pour limiter les chutes de tension. L'ensemble des sections des fils porteurs et des fils de travail varie de 400 mm² (caténaire normale) à 480 mm² (caténaire renforcée). Cependant, ces valeurs sont parfois insuffisantes et il faut alors installer un câble supplémentaire, en cuivre ou en aluminium, sans fonction mécanique, appelé *feeder*. L'ensemble constitue des lignes assez lourdes comme le montre la figure IV-28.

De plus, pour régulariser la tension des fils de contact quelle que soit la température, ceux-ci sont reliés tous les 1 200 m environ à des *tendeurs* à contrepoids, qui les maintiennent à une tension moyenne voisine de 1 250 daN.

3° *Alimentation en énergie des lignes de contact.* — Les lignes de contact sont alimentées par les sous-stations par l'intermédiaire de disjoncteurs ultra-rapides, placés dans des cabines, et de sectionneurs, installés sur des poteaux extérieurs. Dans le cas général des lignes à deux voies, ces « départs » comportent :

— soit un seul disjoncteur pour alimenter les deux voies situées du même côté, amont ou aval, de la sous-station, et celle-ci ne possède, au total, que deux disjoncteurs de départ ;

— soit un disjoncteur pour chacune des voies et pour chaque côté, chaque sous-station ayant alors quatre disjoncteurs de départ. C'est le cas le plus général.

Entre deux sous-stations, il existe (V. fig. IV-29) :

— *des postes de mise en parallèle*, qui réduisent les chutes de tension au pantographe en régularisant la charge entre les lignes des deux voies ;

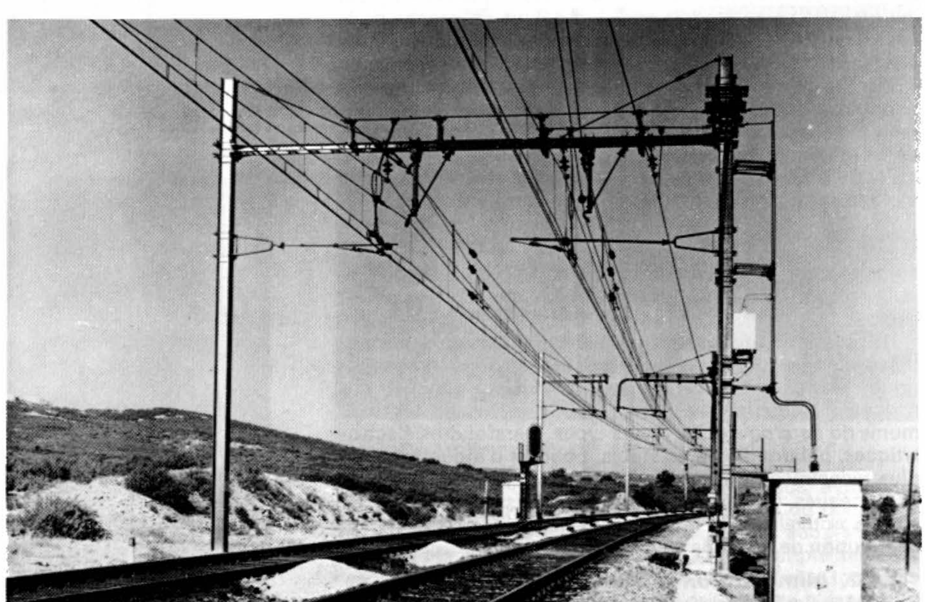
— des *postes de sectionnement*, dont le rôle est de limiter la longueur des zones à priver de courant pour les travaux de réparation ou d'entretien. Ces postes assurent normalement la continuité des lignes afin, d'une part, de réduire également les chutes de tension grâce à une double alimentation et, d'autre part, d'éviter à leur passage de supprimer l'effort de traction.

4° *Protection des lignes de contact.* — Pour protéger efficacement une ligne en cas de défaut à la masse, tous les disjoncteurs concourant à l'alimentation *d'une voie*, qu'ils soient installés dans une sous-station ou dans un poste de voie, sont asservis les uns aux autres :

— soit par un fil pilote branché, côté positif au départ 1,5 kV d'une sous-station, et côté négatif à l'autre sous-station ;

Fig. IV-28

Caténaire renforcée avec feeder ; à droite, poste de mise en parallèle à 2 disjoncteurs (*S.N.C.F.*)



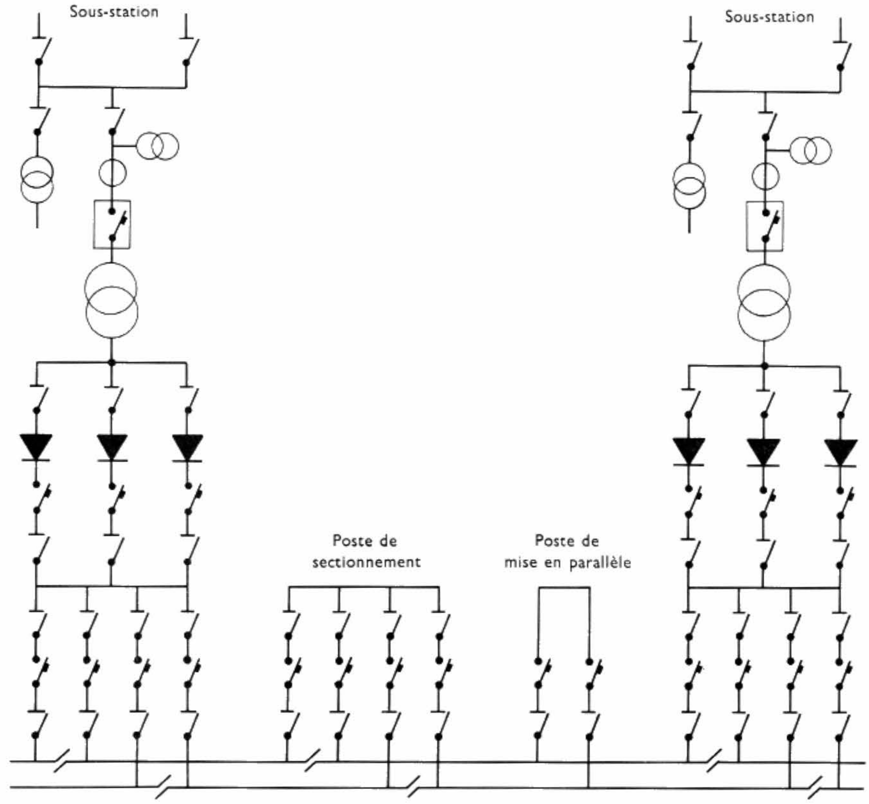


Fig. IV-29

Alimentation des caténaires à courant continu

— soit par un câble spécial réalisant un circuit 115 V à courant continu, dit circuit d'asservissement, qui relie les circuits de commande des différents disjoncteurs ; dans les installations modernes, la tension de ce circuit a été ramenée de 115 à 48 V afin d'utiliser des paires du câble de télécommunications ;

— soit en utilisant les circuits téléphoniques dans lesquels sont émises des impulsions de fréquences supérieures à celles des fréquences vocales.

Par ailleurs, le dispositif de protection doit être tel qu'un défaut soit immédiatement décelé, et provoque la mise hors tension rapide de la ligne considérée. Les disjoncteurs s'ouvrent sous l'effet, soit d'une surintensité, soit d'une variation rapide de l'intensité $\left(\frac{di}{dt}\right)$. Toutefois, en raison de la résistance électrique de la ligne, le déclenchement par surintensité ne se produit que si le défaut est proche de la sous-station (environ 4 à 5 km). L'action par variation d'intensité du courant, beaucoup plus sensible, était suffisante pour assurer une protection efficace jusqu'à l'apparition des locomotives très puissantes. Aux changements de couplage ou au passage des sectionnements, celles-ci provoquant des variations d'intensité du même ordre de grandeur que celles découlant d'un défaut un peu éloigné du disjoncteur, il a fallu « désensibiliser » les disjoncteurs vis-à-vis de la variation $\frac{di}{dt}$. La protection est complétée par des relais de tension installés dans les postes, et en pleine voie, qui agissent sur les circuits d'asservissement.

De plus, les lignes et surtout les disjoncteurs sont susceptibles d'être endommagés par des surtensions atmosphériques ou des coups de foudre directs. Pour diminuer ces risques d'incidents, les sous-stations et les postes sont munis de *parafoudres* de divers types : parafoudres électrolytiques, parafoudres à éclateurs, bobines d'inductance, et, plus récemment, de parafoudres à éclateurs et résistances non linéaires. Ce dernier type, le seul utilisé dans les installations nouvelles, est le plus efficace (V. t. 2, Transport et distribution de l'énergie électrique, chap. 6).

3.4.2. Alimentation monophasée

1° *Caténaires.* — L'utilisation d'une alimentation monophasée à 25 kV conduit à des chutes de tension en ligne nettement moins grandes qu'avec le courant continu sous 1,5 kV et la section totale de la ligne ne dépasse généralement pas 150 mm². Aussi utilise-t-on une caténaire légère ne comportant pas de porteur auxiliaire, mais seulement un porteur unique en bronze à l'étain et un seul fil de contact en cuivre dur. Toutefois, pour les vitesses supérieures à 120 km/h, la constance de la flexibilité du fil de contact est améliorée par l'adoption, au droit des supports, d'une suspension en Y, constituée grâce à un tronçon de câble auxiliaire (fig. IV-30). Par ailleurs, des installations récentes équipant

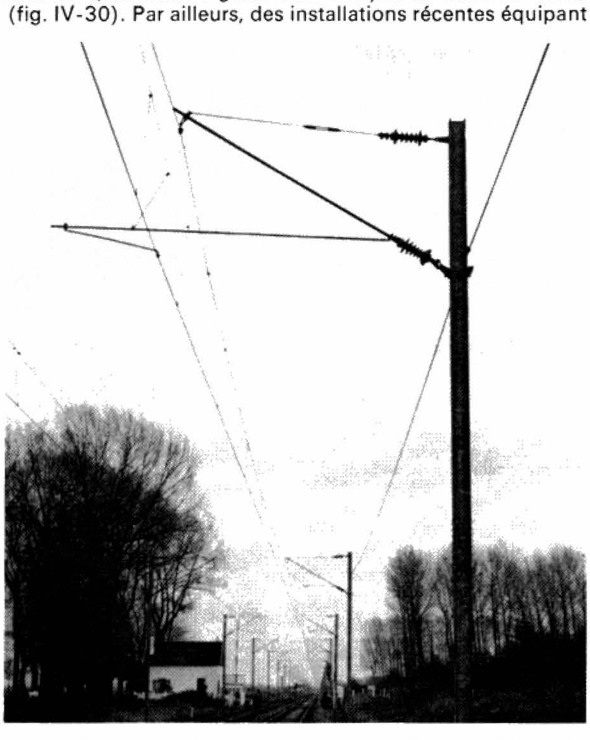


Fig. IV-30 — Caténaire monophasée et suspension en Y (*S.N.C.F.*)

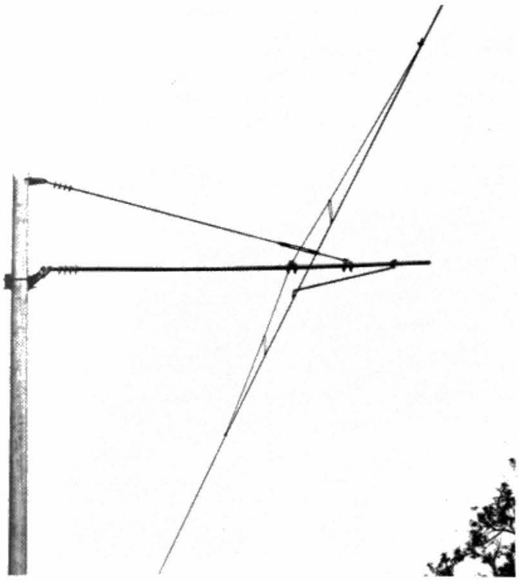


Fig. IV-31 — Caténaire simplifiée avec armement entièrement synthétique (console, hauban et rappel) (*S.N.C.F.*)

des voies secondaires ou à faible trafic ne comportent que le seul fil de contact retenu à chaque support par une suspension souple pendulée ou non, constituée par un câble de 8 m de long. En outre, le fil a une tension régularisée entre — 20 °C et + 50 °C.

Cette disposition donne de très bons résultats, même à des vitesses dépassant 100 km/h. Avec ses supports elle constitue une installation particulièrement simple, dont le prix est d'environ 30 % inférieur au prix d'une caténaire ordinaire (fig. IV-31). A noter aussi l'utilisation récente comme isolants, de matériaux synthétiques peu sensibles à la carbonisation superficielle, en remplacement des matériaux habituels comme le verre et la porcelaine.

2° *Alimentation en énergie des caténaires.* — Les lignes à 25 kV sont alimentées, au départ de chaque sous-station à travers un seul disjoncteur protégeant les deux voies. En aval de celui-ci, chaque voie est connectée par l'intermédiaire d'un interrupteur à commande électrique

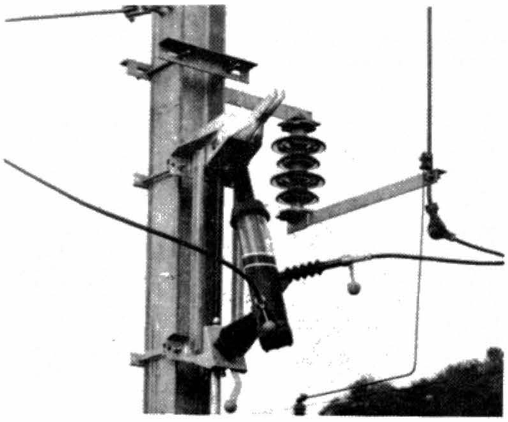


Fig. IV-32 — Interrupteur à commande électrique placé sur poteau (*S.N.C.F.*)

(fig. IV-32). Entre deux sous-stations, sont installés : un poste de sectionnement principal et des postes de sous-sectionnement et de mise en parallèle, placés généralement tous les 10 à 15 km.

Les postes ne comportent que des interrupteurs à commande électrique. Le poste de sectionnement principal sépare les zones d'action de deux sous-stations voisines, les phases 25 kV pouvant être différentes ; à cet effet il comporte pour chaque voie une section neutre dite section de séparation, qui peut être mise sous tension en cas de besoin

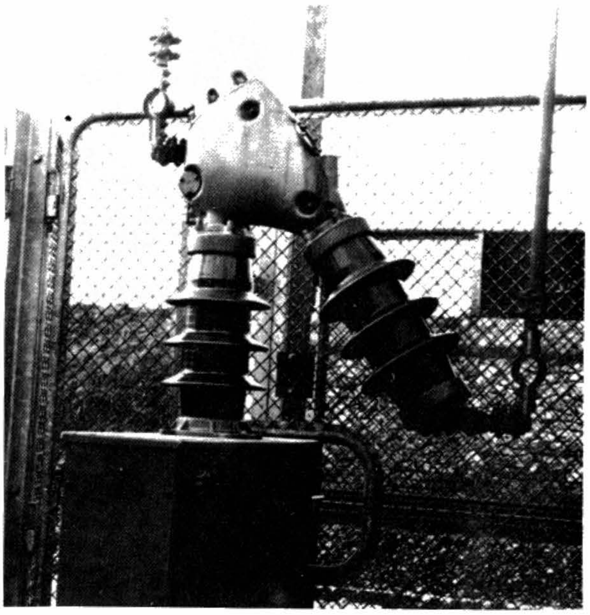


Fig. IV-33 — Interrupteur 25 kV placé en cellule (*S.N.C.F.*)

en fermant un interrupteur. Les disjoncteurs et les interrupteurs sont des appareils haute tension à faible volume d'huile.

À l'origine, chaque interrupteur était associé à un sectionneur bipolaire qui permettait de l'isoler pour l'entretien, tout en laissant la caténaire sous tension. Posé au sol sur un massif, il était placé dans une cellule grillagée (fig. IV-33). En 1963 est apparu un nouveau type d'interrupteur dit « aérien » qui se place à la partie supérieure des supports de départ des sous-stations et des postes. Cette disposition a permis de supprimer les massifs et les grillages et même les sectionneurs d'isolement car la partie active de l'interrupteur peut être échangée très rapidement pour son entretien à l'atelier. Les installations de postes ont ainsi été notablement simplifiées (fig. IV-34).

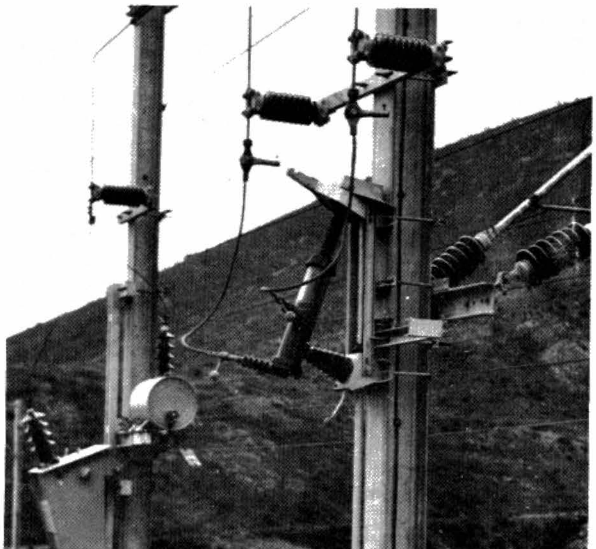


Fig. IV-34 — Poste avec interrupteur aérien (*S.N.C.F.*)

3° *Protection des caténaires.* — Nous avons vu (V. § 3.3.2, 2°) que la protection des lignes de contact à 25 kV était assurée par les disjoncteurs des sous-stations commandés par des relais d'admittance. Compte tenu de l'espacement des sous-stations, il est difficile toutefois d'obtenir une sélection automatique des défauts, c'est-à-dire

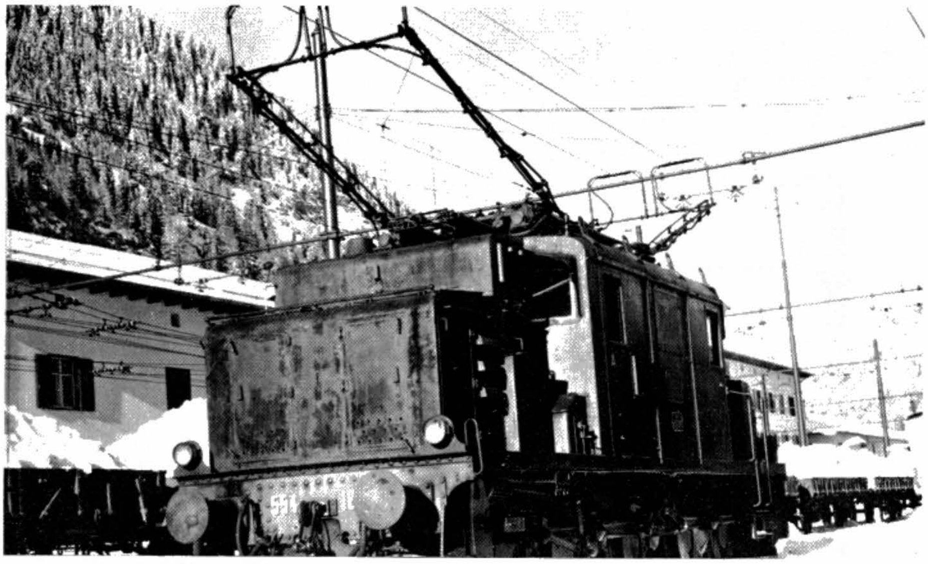


Fig. IV-35

Ligne aérienne sous alimentation triphasée 3,7 kV (*Vie du Rail-Y.M.T.*)

de n'isoler qu'un petit élément de caténaire entourant le défaut. La séparation entre voies et entre sous-secteurs d'une même voie n'est obtenue que par télécommande volontaire des interrupteurs de postes et sous-stations qui subdivisent le secteur.

Les défauts sont en majorité fugitifs et disparaissent après quelques secondes, il suffit donc souvent de procéder à un seul réenclenchement automatique pour que le réseau redevienne normal sans qu'aucune sélection n'ait été nécessaire.

Cependant le dispositif de protection des lignes est complété par des relais *à baisse de tension*, placés dans les postes de sectionnement qui, après l'ouverture des disjoncteurs, provoquent, si les sous-stations sont en parallèle, l'ouverture des interrupteurs de pontage. Le sectionnement étant rétabli, les réenclenchements automatiques sont facilités et le secteur défectueux est plus aisément décelé.

Par ailleurs l'expérience a montré qu'il était inutile de protéger les lignes à 25 kV contre les surtensions atmosphériques, celles-ci étant inférieures au niveau d'isolement du matériel. Seuls les appareils comportent à leurs bornes de simples éclateurs à tige, qui les protègent de façon suffisante.

3.4.3. Alimentation triphasée. — À l'origine, l'alimentation des engins moteurs triphasés était réalisée au moyen de trois conducteurs aériens, superposés, disposés sur le côté de la voie. Les trois archets, fixés au même support étant verticaux, il n'était pas nécessaire que les fils de contact soient bien horizontaux. Mais les difficultés d'installation, notamment sous les ponts et dans les tunnels, ont fait abandonner cette disposition, qui a été remplacée par une ligne constituée de deux conducteurs aériens placés horizontalement de part et d'autre de l'axe de la voie, la troisième phase étant raccordée aux rails. Les fils aériens sont chacun suspendus à un porteur, pour constituer deux lignes à suspension caténaire simplifiée (fig. IV-35). Les locomotives comportent alors deux trolleys, toujours en prise pour éviter les coupures de courant au droit des aiguillages, chacun d'eux supportant deux archets, un par fil de contact.

3.4.4. Télécommande des sous-stations et postes de traction

1° *Modalités d'exploitation.* — À l'origine des électrifications, les sous-stations étaient exploitées localement par des agents assurant une permanence. Par la suite apparurent des automatismes conçus pour surveiller les machines et assurer quelques opérations banales telles que des réenclenchements et des mises en service de groupes ; mais le personnel, bien que de plus en plus mal utilisé à mesure que l'appareillage se modernisait, devait être maintenu car les automatismes ne pouvaient servir lorsqu'il fallait prendre des initiatives. Pour remédier à cette situation, on a développé la commande à distance, solution d'autant plus envisageable que disparaissaient les groupes tournants difficiles à surveiller à distance. Une solution transitoire a consisté à confier la commande des sous-stations aux gares voisines, qui manœuvraient sur ordre d'un régulateur ; bien entendu, un tel système est lent et ne saurait convenir à des lignes importantes.

Actuellement, sous-stations et postes sont télécommandés par des « centraux sous-stations » permettant une exploitation souple et une grande efficacité d'action lors des incidents : le même agent contrôle toute une zone et peut rapidement localiser un défaut et y remédier. La zone d'action d'un central sous-stations à la S.N.C.F. peut inclure jusqu'à une trentaine d'installations télécommandées réparties sur 600 km de voies ferrées.

2° *Équipements de télécommande.* — La télécommande d'une installation consiste à transmettre des ordres aux appareils commandés et à recevoir les signalisations de position émises par ces mêmes appareils, ou d'autres organes auxiliaires, ne pouvant généralement occuper que deux positions. L'exploitation se fait très souvent à partir d'un tableau synoptique reprenant les schémas des postes commandés et des voies, les appareils étant figurés par des commutateurs et les signalisations supplémentaires aboutissant à des voyants lumineux (fig. IV-36). Pour chaque liaison, l'équipement est installé, d'une part, au central, d'autre part, dans le poste commandé. La transmission d'informations implique le choix d'un milieu de transmission : généralement c'est un circuit du câble de télécommunications souvent posé dans les emprises de la voie ferrée. Ce choix détermine les caractéristiques techniques du mode de transmission : fréquences, niveaux, etc.

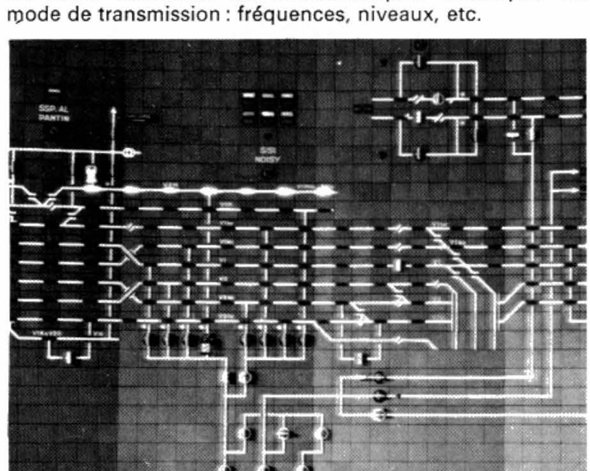


Fig. IV-36 — Tableau de commande d'un central sous-stations (vue partielle) ; constructeur Jeumont-Schneider (*S.N.C.F.*)

Un équipement de télécommande comporte deux ensembles d'appareillage : celui de transmission chargé d'élaborer, d'amplifier, de filtrer, de moduler les courants émis sur la ligne de transmission et celui de commutation, qui établit la structure des messages émis et décode les messages reçus. Le support d'un message est constitué par un ou des courants de fréquences déterminées, ce qui permet dans certains systèmes de sélectionner le destinataire ; le contenu de ce message est donné par une combinaison d'altérations fugitives de ce ou ces courants. Compte tenu de la technologie des équipements de commutation, qui utilisent des bascules binaires, ces altérations sont toujours de deux types dans un système donné : par exemple, modulation de fréquence à 35 Hz.

Les systèmes de télécommande en service sont d'une grande diversité. Ils peuvent être rapides ou relativement lents selon que l'équipement de commutation met en œuvre des éléments électroniques ou des relais ; dans le premier cas, la transmission occupe une large bande et le système fonctionne souvent en exploration cyclique permanente des postes ; dans le second cas, la bande de transmission étroite permet d'utiliser simultanément plusieurs fréquences généralement choisies parmi celles normalisées en télégraphie harmonique (multiples impairs de 60 Hz, à partir du septième).

La fidélité, absolument indispensable, des télécommandes est garantie par des contrôles de codes exécutés, soit à l'émission, soit à la réception, et dont le bon résultat conditionne l'exécution des ordres enregistrés.

4. PARAMÈTRES CARACTÉRISANT LES PERFORMANCES DES ENGINS MOTEURS

4.1. Généralités. — La traction d'une rame de véhicules nécessite l'application d'un effort de traction égal à la somme des efforts résistants correspondant à la vitesse et au profil de ligne considérés. Pendant le démarrage l'effort de traction doit être supérieur à l'effort résistant pour permettre la mise en vitesse du convoi avec une accélération telle que :

$$\gamma = \frac{F_t - F_r}{M}$$

F_t : effort de traction
F_r : effort résistant du convoi, engin moteur compris
M : masse du convoi

Les performances des engins moteurs peuvent donc être définies, de la même manière que la résistance à l'avancement des véhicules, au moyen des courbes ou plus précisément de réseaux de courbes donnant la valeur de l'effort de traction en fonction de la vitesse. Ces courbes dépendent, entre autres facteurs, des caractéristiques des moteurs de traction utilisés.

4.2. Caractéristiques du moteur de traction à excitation série. — Dans la quasi-totalité des cas, en traction, il est fait usage de moteurs à collecteur à excitation série dont la caractéristique couple-vitesse convient particulièrement bien pour cet emploi. De plus, les enroulements inducteurs série en conducteurs de forte section sont très robustes, contrairement aux inducteurs à fil fin des moteurs à excitation en dérivation (moteur shunt).

Les relations fondamentales du moteur à excitation série s'écrivent comme suit (V. t. 2, Électrotechnique, chap. 17) :

Force contre-électromotrice $E' = \frac{p}{a} N n \Phi = U - R_a I$ (1)

Fréquence de rotation $n = \frac{a}{p} \frac{U - R_a I}{N \Phi}$ (2)

Puissance mécanique $P = U I \eta$ (3)

Moment du couple moteur $T = \frac{p}{a} \frac{\Phi I N}{2 \pi} = K \Phi I$ (4)

avec les notations suivantes :
E' force contre-électromotrice en volts,
U tension d'alimentation en volts,
I intensité du courant absorbé en ampères,
n fréquence de rotation en tours par seconde (souvent appelée vitesse de rotation),
N nombre de conducteurs périphériques de l'induit,
p nombre de paires de pôles,
a nombre de paires de voies d'enroulement de l'induit,
Φ flux par pôle en webers,
R_a résistance interne totale du moteur (induit + enroulements statoriques) en ohms,
η rendement du moteur,
T moment du couple en newtons-mètres,
K constante.

Le flux inducteur est lié à l'intensité du courant suivant une loi variable avec la saturation du circuit magnétique. Le couple est donc fonction seulement de l'intensité du courant et la relation (4) peut s'écrire :

$$T = K I^q \text{ avec } 1{,}25 < q < 2$$

La figure IV-37 montre la forme pratique d'une courbe $T = f(I)$. La caractéristique vitesse-courant $n = f(I)$ vérifie la relation (2). Si la tension d'alimentation U est constante, la force contre-électromotrice E', qui n'en diffère que par le terme $R_a I$ de faible valeur (R_a étant faible), varie peu, le produit $\Phi\, n$ doit également peu varier, donc Φ et n varient en sens inverse. À chaque valeur de couple demandé au moteur, correspond une valeur de flux de laquelle découle une vitesse telle que :

$$\frac{p}{a} N n \Phi = U - R_a I$$

La figure IV-38 représente la caractéristique $n = f(I)$. La caractéristique couple-vitesse $T = f(n)$ se déduit des deux courbes précédentes $T = f(I)$ et $n = f(I)$. Elle peut être complétée par l'indication des intensités des courants comme sur la figure IV-39.

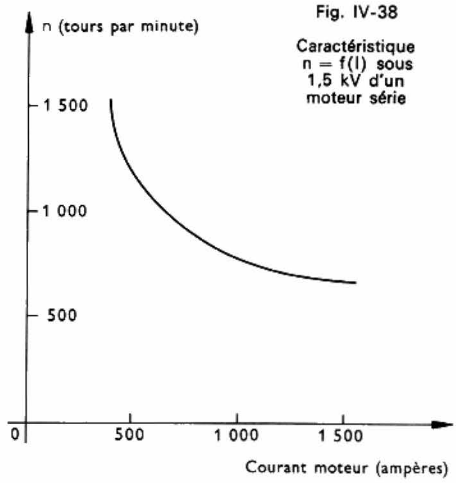


Fig. IV-38

Caractéristique n = f(I) sous 1,5 kV d'un moteur série

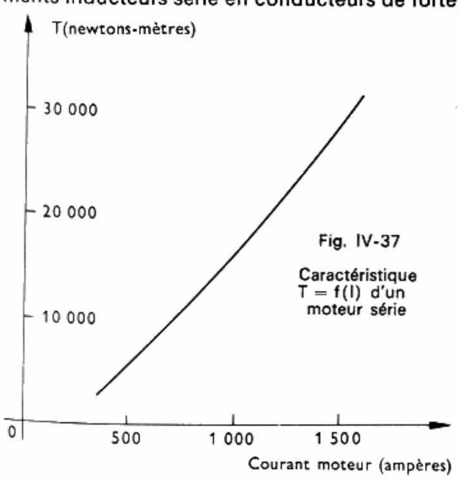


Fig. IV-37

Caractéristique T = f(I) d'un moteur série

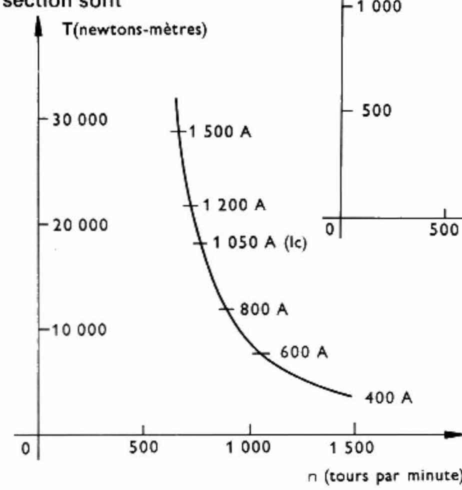


Fig. IV-39

Caractéristique T = f(n) d'un moteur série

4.3. Caractéristiques effort-vitesse. — La courbe effort-vitesse d'un engin moteur est liée directement à la caractéristique couple-vitesse de ses moteurs de traction par les paramètres de la chaîne cinématique de transmission du couple aux roues (rapport d'engrenages, diamètre des roues, rendement de la transmission, nombre de moteurs). Si l'on désigne par :

n la fréquence de rotation du moteur en tours par seconde,
T le moment du couple sur l'arbre du moteur en newtons-mètres,
ρ le rapport d'engrenages de la transmission : $\dfrac{\text{vitesse de rotation du moteur}}{\text{vitesse de rotation de l'essieu}}$
η le rendement de la transmission,
D le diamètre des roues motrices en mètres,
V la vitesse de l'engin en kilomètres par heure,
l'effort aux jantes F en newtons est égal à :

$$F = \frac{2\ T \rho \eta}{D} \qquad (5)$$

et la vitesse V de l'engin en kilomètres par heure est donnée par la relation :

$$V = \frac{3{,}6\pi\ n\ D}{\rho} \qquad (6)$$

Les caractéristiques effort-courant $F = f(I)$ et effort-vitesse $F = f(n)$ se déduisent respectivement des courbes $T = f(I)$ et $T = f(n)$. Le rendement de la transmission variant peu, les courbes $T = f(I)$ et $F = f(I)$, d'une part, et $T = f(n)$ et $F = f(n)$ d'autre part, ont le même aspect. La caractéristique considérée dans la pratique est $F = f(V)$ avec V en kilomètres par heure. Elle se déduit de $F = f(n)$ par la relation (6). La figure IV-40 montre la courbe $F = f(V)$, d'une locomotive de puissance moyenne (2 940 kW) calculée pour la tension nominale (1,5 kV) de ses moteurs de traction. Une telle caractéristique est particu-

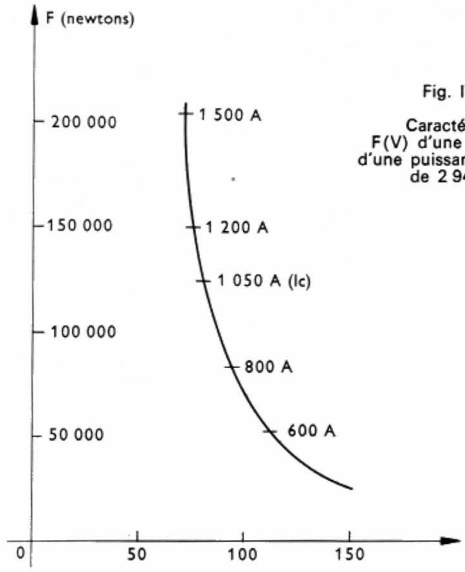


Fig. IV-40

Caractéristique F(V) d'une locomotive d'une puissance moyenne de 2 940 kW

lièrement favorable à la traction, elle garantit un fonctionnement stable : à tout effort résistant correspond une vitesse bien déterminée. Aux faibles vitesses elle permet de développer des efforts intenses qui sont cependant limités par deux paramètres, à savoir :

1° L'adhérence des roues sur le rail. — Les caractéristiques électriques et les dispositions mécaniques des engins ont une grande influence sur les conditions d'utilisation de l'adhérence roue-rail. Dans la plupart des cas c'est l'adhérence qui conditionne la charge maximale démarrable par un engin.

2° L'échauffement des moteurs de traction. — Pour chaque type de moteur de traction il est établi, à la suite d'essais en plate-forme :

— un régime continu, admissible en permanence,
— un régime unihoraire avec départ à froid.

Ces deux régimes sont définis par l'intensité du courant admissible à la tension nominale, à une vitesse dite de définition et dans les conditions normales de ventilation, pour ne pas dépasser les limites d'échauffement fixées par la Commission électrotechnique internationale pour les différentes classes d'isolation.

Pendant une courte période, lors d'un démarrage, il est possible, en raison de l'inertie thermique du moteur, d'admettre un courant atteignant jusqu'à 1,7 fois la valeur définissant le régime continu. De même, cette valeur peut être dépassée temporairement, par exemple, à la montée d'une rampe. La caractéristique $F = f(V)$ peut être graduée en courants. Pour toute vitesse supérieure au régime continu, la puissance développée par le moteur est inférieure à celle définie à ce régime.

5. LOCOMOTIVES

5.1. Partie mécanique

5.1.1. Désignation des engins à partir de la configuration du train roulant (Ces dispositions s'appliquent également aux autres modes de traction.) — Les engins moteurs, locomotives et automotrices sont désignés par un numéro de série, propre à chaque administration, généralement précédé par des symboles schématisant la configuration du train roulant constitué, soit uniquement d'essieux moteurs, soit d'essieux moteurs et d'essieux porteurs. Les essieux d'un même engin peuvent être liés mécaniquement par leurs boîtes d'essieux et les organes de suspension, soit à un châssis unique, soit à plusieurs châssis. Ce sont ces considérations qui ont été retenues par l'Union internationale des chemins de fer pour définir les règles d'établissement des symboles de désignation. Celles-ci explicitées dans la fiche U.I.C. n° 612-0, peuvent se résumer comme suit :

1° *Essieux appartenant à un même châssis* (fig. IV-41) :

a) Les essieux porteurs sont désignés par des chiffres arabes dont la valeur indique le nombre d'essieux successifs de même nature.

b) Les essieux moteurs sont désignés par des lettres latines capitales, sans indice, lorsqu'ils sont accouplés, avec l'indice 0 (zéro) lorsqu'ils sont à commande individuelle. Le rang de ces lettres dans l'alphabet indique le nombre d'essieux successifs de même nature. Dans un même châssis, les groupes d'essieux successifs de même

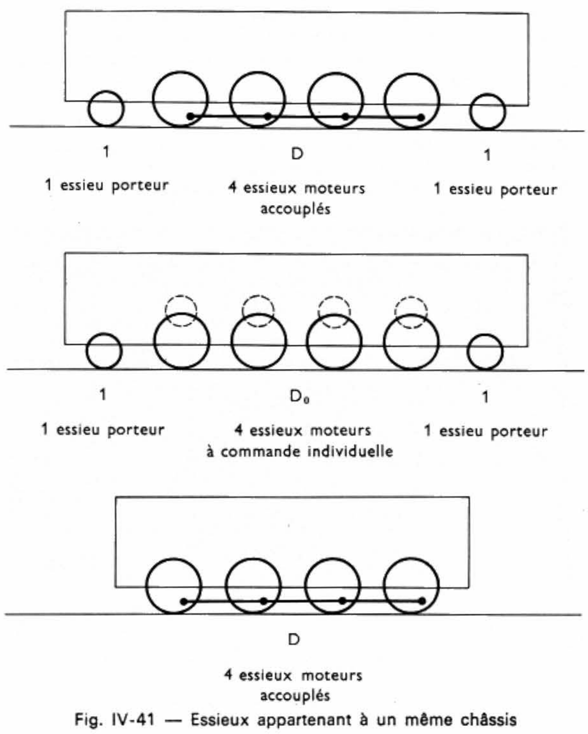


Fig. IV-41 — Essieux appartenant à un même châssis

nature sont désignés en plaçant à la suite l'un de l'autre les symboles caractérisant ces groupes.

L'absence d'essieux porteurs n'est indiquée par aucune notation spéciale. Ces désignations s'appliquent, sans aucune addition, aux essieux ou groupes d'essieux appartenant au châssis principal.

2° *Essieux appartenant à des châssis différents* (fig. IV-42). — Les mêmes désignations s'appliquent aux essieux ou groupes d'essieux appartenant à un châssis secondaire. Leur notation est affectée d'une apostrophe si elle comporte un seul chiffre ou une seule lettre; elle est placée entre parenthèses si elle comprend plusieurs chiffres ou lettres. Les essieux utilisés comme essieux porteurs et

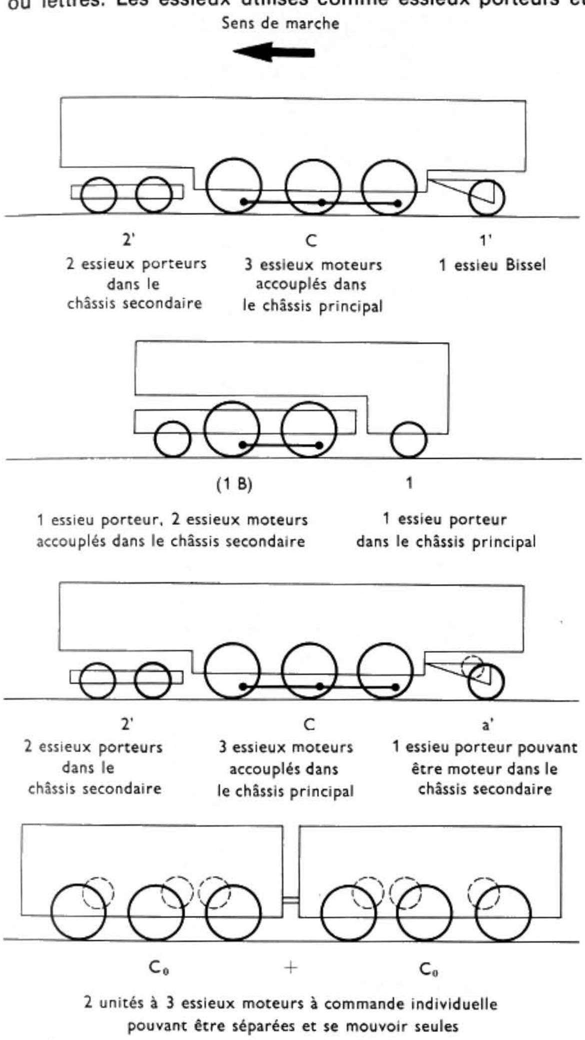


Fig. IV-42 — Essieux appartenant à des châssis différents

pouvant, à l'aide d'un mécanisme auxiliaire, servir d'essieux moteurs, sont désignés par des lettres latines minuscules. Les engins, composés de plusieurs unités pouvant être désaccouplées et déplacées indépendamment ont leurs symboles respectifs séparés par le signe plus (+). Les règles ci-dessus, utilisées dans les statistiques, ne sont pas passées systématiquement dans le langage courant: ainsi, à la S.N.C.F., par exemple, les locomotives électriques de symboles *B'B'*, $C'_0\ C'_0$, $2'D_02'$ sont désignées respectivement par les groupements simples suivants: *BB*, *CC*, *2D2* (fig. IV-43). De même, il est fait usage de la lettre *Z* pour désigner une automotrice électrique.

5.1.2. Transmission du couple moteur. — Le couple mécanique développé par le ou les moteurs de traction est transmis aux essieux au moyen d'une chaîne cinématique appropriée pour produire l'effort de traction. Une solution très simple consiste à caler directement l'induit du moteur sur l'axe d'essieu, l'inducteur étant solidaire du châssis du

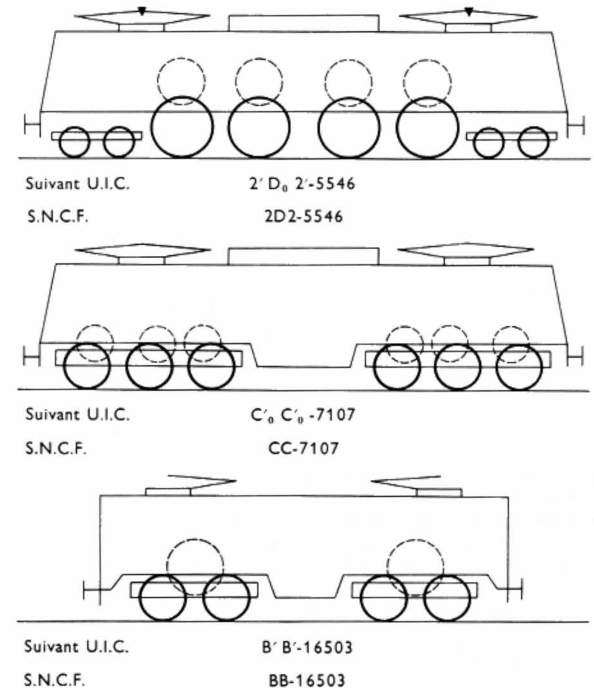


Fig. IV-43 — Disposition du train roulant des locomotives électriques

véhicule. Cette disposition n'a fait l'objet que de rares applications au début de la traction électrique. Elle est complètement abandonnée de nos jours en raison des sérieux inconvénients qu'elle présente: grand entrefer donc mauvais rendement du moteur, chocs importants à l'induit, néfastes pour la tenue du bobinage et du collecteur, difficultés de commutation, dimensionnement onéreux d'un moteur à faible vitesse, augmentation des masses non suspendues, etc.

Hormis ce système qui n'est cité que pour mémoire, il existe deux grandes catégories de dispositifs de transmission, l'une concerne les moteurs semi-suspendus, l'autre les moteurs entièrement suspendus.

1° *Moteurs semi-suspendus*

a) *Moteur suspendu par le nez.* — C'est un des systèmes de transmission qui se rencontre le plus fréquemment sur de nombreux matériels anciens et sur certains engins récents dont la vitesse n'excède pas 100 km/h (locomotives pour trains de marchandises ou service de manœuvres de gare ou de triage; fig. IV-44). Dans cette disposition,

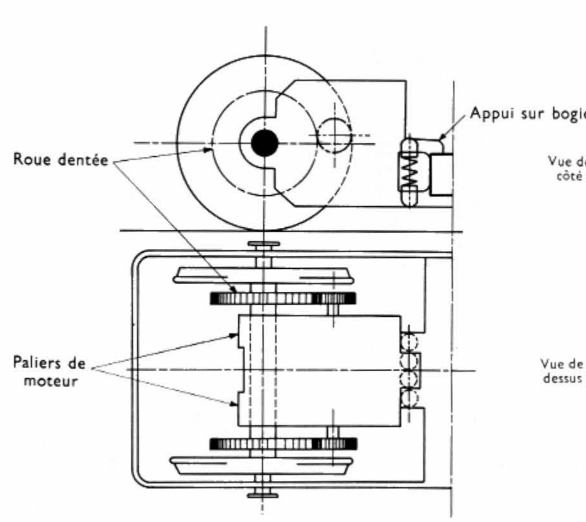


Fig. IV-44 — Schéma de principe d'un moteur de traction suspendu par le nez

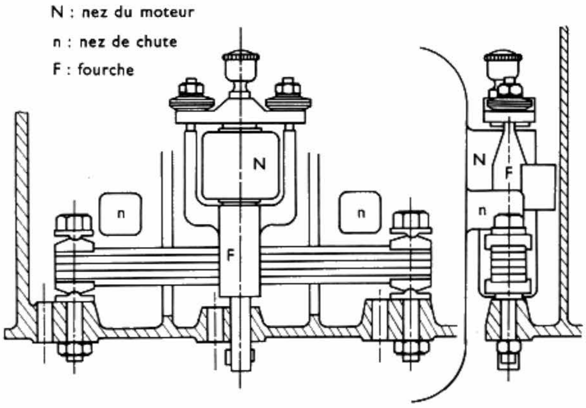
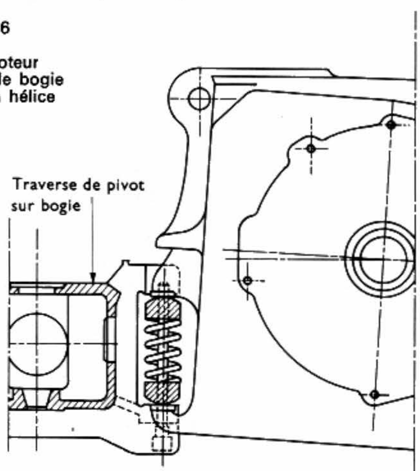


Fig. IV-45 — Appui du moteur sur le châssis de bogie par ressort à lames

appelée également suspension « tramway », le moteur repose en trois points dont deux directement sur l'essieu par des paliers appropriés, faisant partie de la carcasse du moteur, le troisième sur le châssis du bogie par l'intermédiaire d'un dispositif élastique comportant soit des ressorts

Fig. IV-46

Appui du moteur sur le châssis de bogie par ressorts en hélice



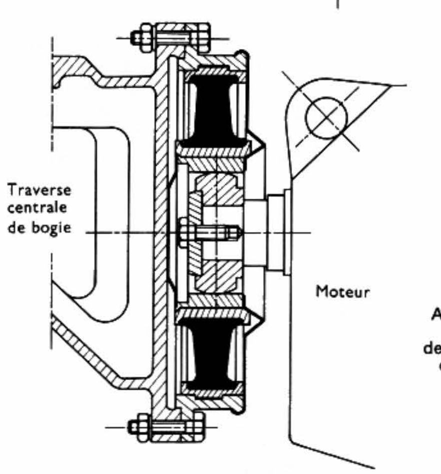


Fig. IV-47

Appui du moteur sur le châssis de bogie par blocs de caoutchouc

à lames (fig. IV-45) ou en hélice (fig. IV-46), soit des éléments de caoutchouc (fig. IV-47). Le couple moteur est transmis directement du pignon moteur à une roue dentée calée directement sur l'axe d'essieu. Pignon et roue dentée, dont l'entraxe est constant, sont enfermés dans un carter étanche contenant l'huile destinée à la lubrification des engrenages. La transmission est dite unilatérale ou bilatérale selon que le couple moteur est transmis au moyen d'un seul train d'engrenages ou de deux trains d'engrenages disposés de part et d'autre du moteur. Pour rendre le démarrage moins brutal et réduire les contraintes sur la denture des engrenages résultant des chocs subis par l'essieu, il est intéressant d'introduire une certaine élasticité angulaire dans le train d'engrenages en utilisant une roue dentée élastique en deux parties. Le moyeu calé sur l'essieu et la couronne dentée peuvent se déplacer angulairement l'un par rapport à l'autre grâce à des organes élastiques (ressorts ou plots de caoutchouc) disposés entre les deux parties de la roue dentée (fig. IV-48).

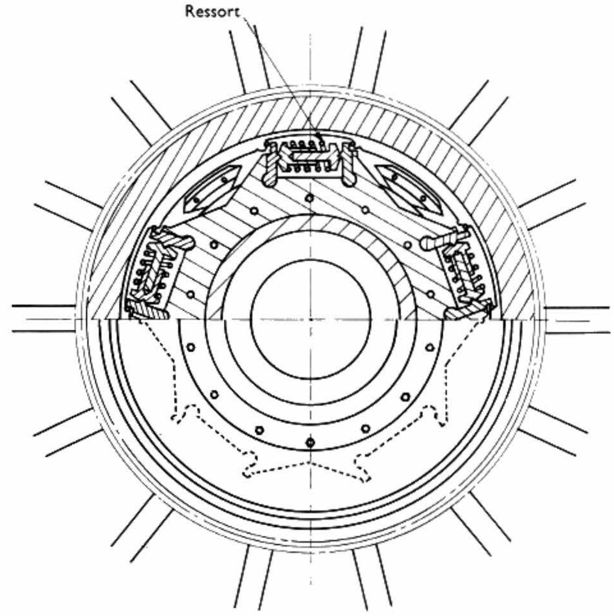


Fig. IV-48 — Roue dentée élastique à ressorts

b) *Moteur semi-suspendu sur arbre creux.* — Ce système diffère du précédent par l'introduction d'un arbre creux disposé autour de l'axe d'essieu et solidaire de deux plateaux réunis aux roues par l'intermédiaire de manetons. Comme dans le cas des moteurs suspendus par le nez, le

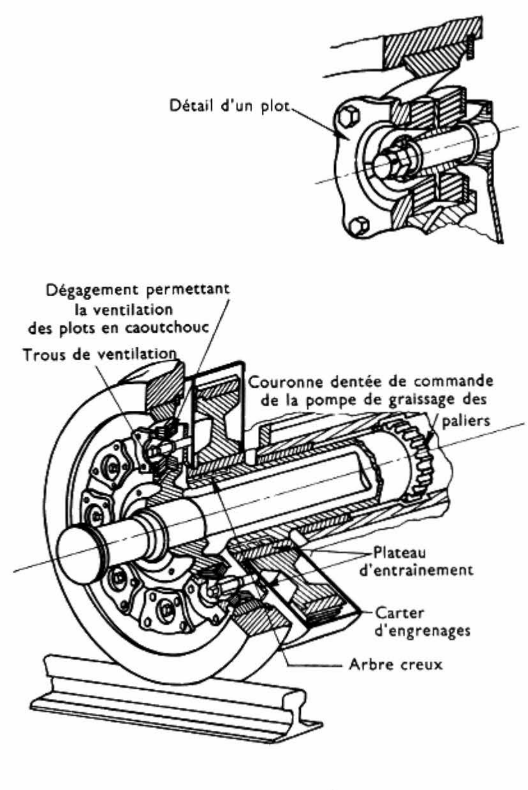


Fig. IV-49

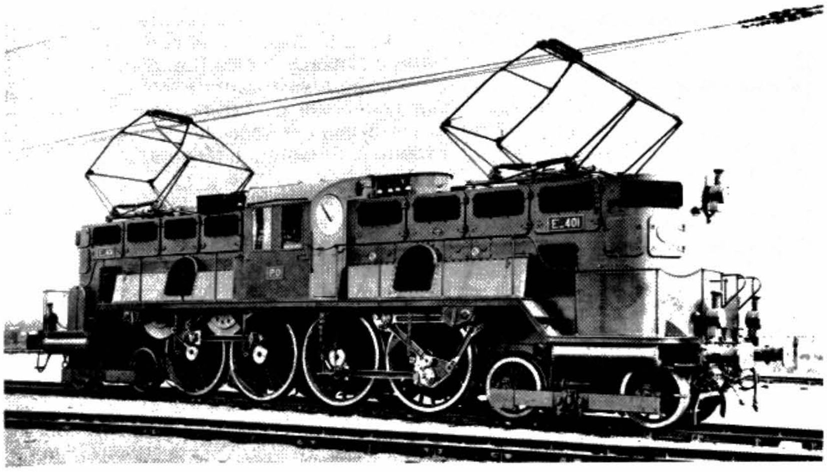


Fig. IV-50

Locomotive électrique
à transmission à bielles 2D2
Ganz de Kando
(*S.N.C.F.*)

moteur est fixé d'un côté sur le châssis de bogie; l'autre extrémité repose sur l'arbre creux au moyen de paliers appropriés. La roue dentée est calée directement sur cet arbre; celui-ci transmet le couple moteur aux roues par l'intermédiaire des plateaux et des manetons d'entraînement qui présentent une certaine élasticité (V. fig. IV-49). Cette disposition permet de reporter une partie du poids du moteur directement sur les roues et non plus sur l'axe d'essieu; cela réduit les contraintes mécaniques auxquelles celui-ci est soumis. Très répandue sur le matériel ferroviaire d'origine italienne, cette transmission est utilisée en France sur certaines automotrices (Z 7100 et certaines Z 5100). La faible élasticité introduite entre le moteur et les roues permet de soustraire partiellement celui-ci aux chocs provenant du roulement de l'essieu sur la voie; il en résulte un certain avantage par rapport au moteur suspendu par le nez.

2° *Moteurs entièrement suspendus.* — Les moteurs de traction sont fixés au châssis du véhicule (châssis de caisse ou châssis de bogie), le système de transmission du couple moteur aux essieux est conçu pour absorber les mouvements relatifs permis par la suspension des véhicules entre le châssis et les essieux. À l'origine, le couple moteur était transmis aux essieux au moyen de bielles comme sur les locomotives à vapeur (fig. IV-50). Les difficultés d'entretien dues à la présence des bielles entraînèrent très vite l'abandon de ce système au profit de la commande par engrenages.

Le fait de rendre le moteur électrique solidaire de la partie suspendue du véhicule permet d'améliorer très sensiblement sa tenue en service car il est ainsi soustrait entièrement aux chocs et percussions, particulièrement néfastes aux grandes vitesses, provoqués par le passage de l'essieu sur les joints de rail et les appareils de voie. Par ailleurs, la diminution de la masse non suspendue liée à l'essieu entraîne une réduction des actions nocives de celui-ci sur la voie. C'est pour ces raisons que tout le matériel moteur à grande vitesse est équipé de moteurs entièrement suspendus.

Il existe une grande variété de systèmes de transmission, ils peuvent être classés en deux groupes selon que les engrenages sont semi-suspendus ou entièrement suspendus.

a) *Engrenages semi-suspendus.* — Dans ce cas, la roue dentée principale commandant l'essieu est directement calée sur ce dernier. Le train d'engrenages est alors disposé dans un carter semi-suspendu reposant, d'une part, sur l'essieu au moyen de paliers et, d'autre part, sur le châssis de bogie par l'intermédiaire d'un système à bielles. Le train d'engrenages présente la même disposition de principe que celle des moteurs suspendus par le nez. Toutefois, la part de la masse non suspendue liée à l'essieu est plus faible. Le pignon moteur étant disposé dans le carter, le couple provenant du moteur est transmis au moyen de dispositifs permettant certains mouvements relatifs entre le moteur et le carter des engrenages. Les systèmes les plus utilisés sont la transmission à arbre intérieur à l'arbre d'induit et la transmission à fourreau à denture intérieure.

— *Transmission à arbre intérieur à l'arbre d'induit.* — Ces transmissions utilisent toutes un arbre disposé intérieurement dans l'axe longitudinal de l'arbre creux de l'induit. Les deux arbres sont reliés entre eux à une extrémité au moyen d'un accouplement tandis que l'autre extrémité de l'arbre intérieur est reliée au pignon moteur par un accouplement analogue.

Les dispositions constructives de ces accouplements caractérisent la transmission :

— transmission à disques flexibles Brown Boveri (fig. IV-51);

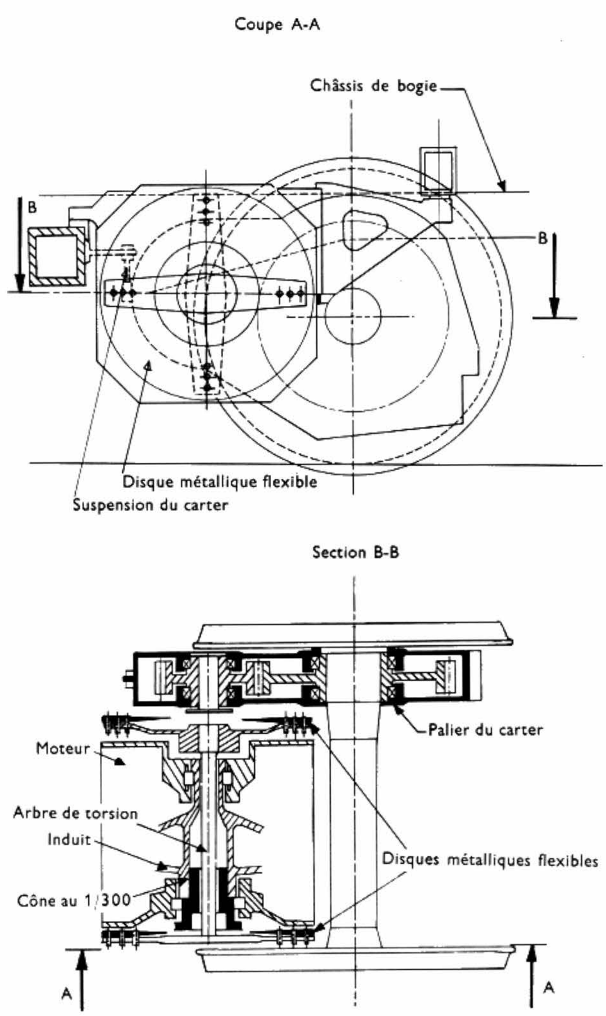


Fig. IV-51 — Transmission à disques (type *Brown Boveri*)

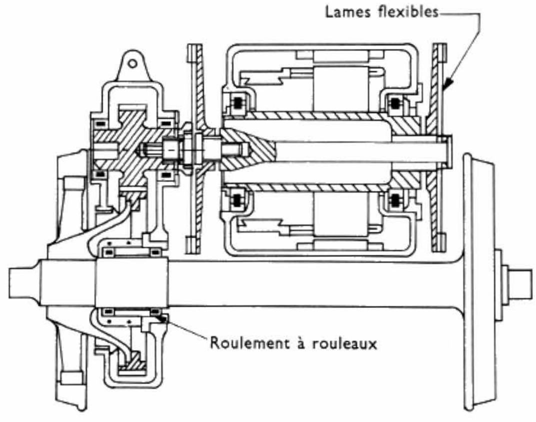


Fig. IV-52

Transmission à lames (type *Sécheron*)

— transmission Sécheron à lames flexibles (fig. IV-52) ;
— transmission A.C.E.C. (Ateliers de construction électrique de Charleroi) à plateaux dentés (fig. IV-53).
— *Transmission à fourreau à denture intérieure.* — À la sortie du moteur l'extrémité de l'arbre d'induit comporte un pignon d'entrée à denture spéciale s'emboîtant à une extrémité d'un fourreau à denture intérieure. L'autre extrémité du fourreau, symétrique de la première, entraîne un pignon de sortie semblable à celui d'entrée et calé en bout du pignon moteur proprement dit (fig. IV-54). Ces systèmes de transmissions avec engrenages semi-suspendus sont pratiquement inexistants en France. Seules les locomotives BB 9001 et 9002, de construction suisse, sont équipées d'une transmission à disques.

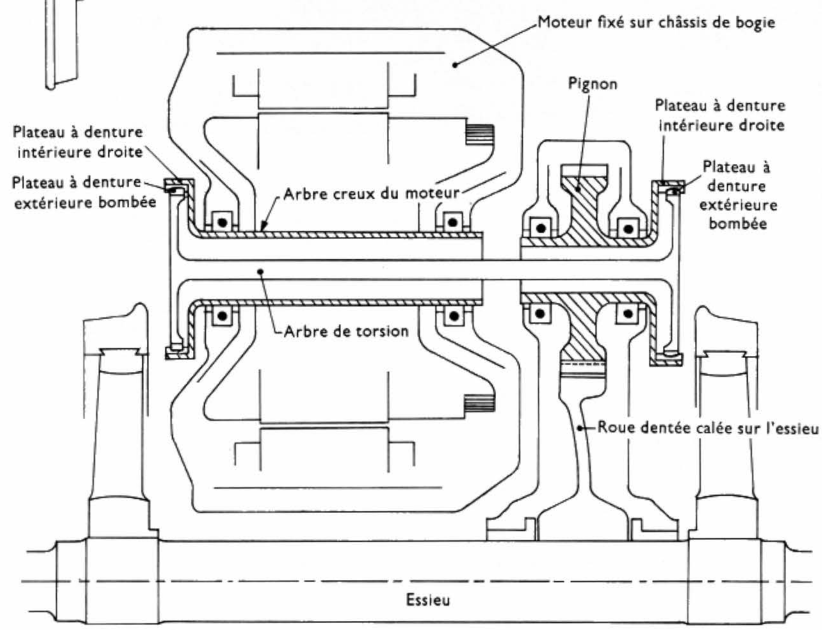


Fig. IV-53

Transmission à plateau à denture intérieure (*A.C.E.C.*)

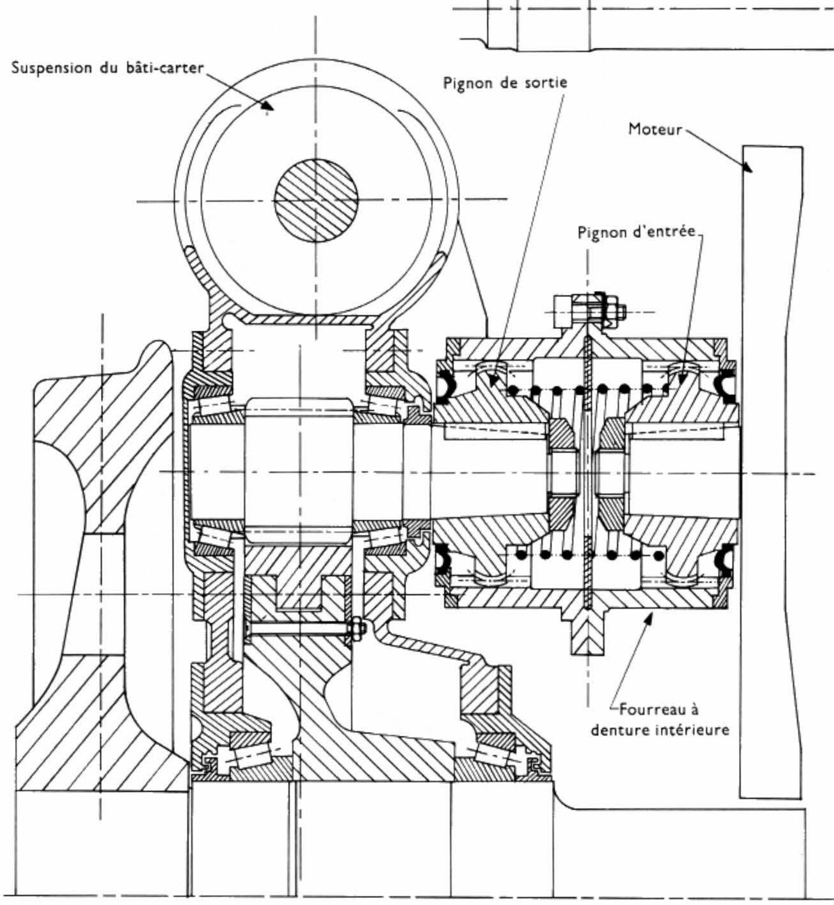


Fig. IV-54

Transmission à fourreau à denture intérieure

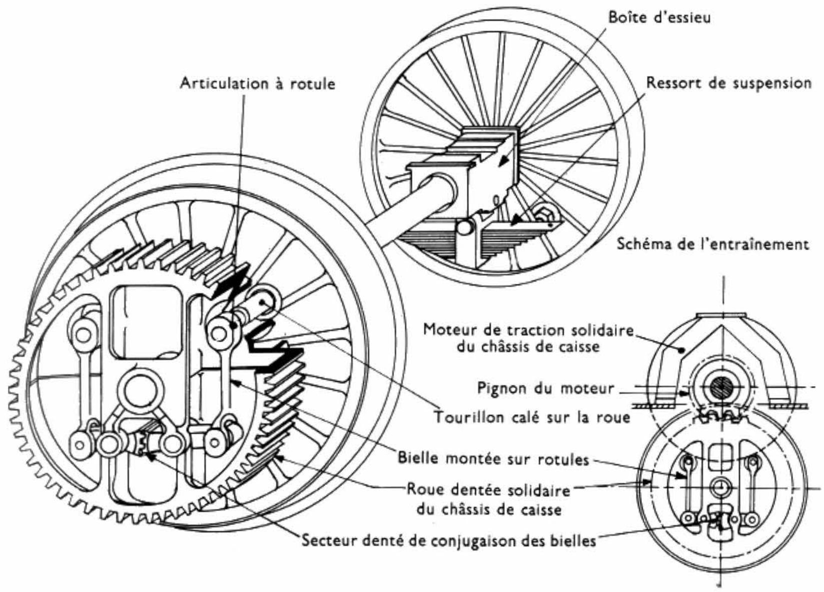
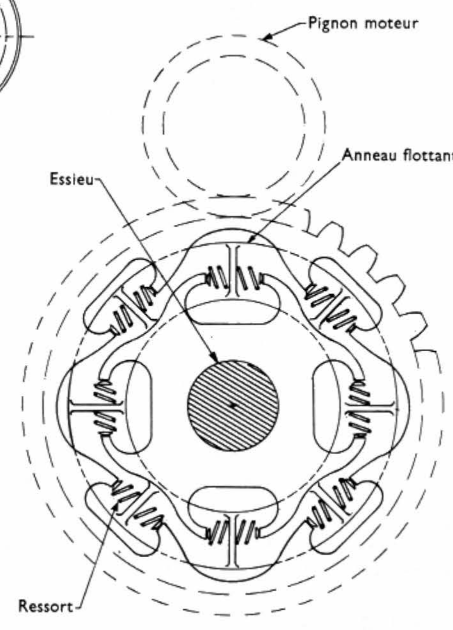


Fig. IV-55

Transmission Büchli

Fig. IV-56

Transmission à ressorts et anneau flottant (type *S.L.M.*)



b) *Engrenages entièrement suspendus.* — Dans ces systèmes, tous les engrenages sont disposés dans un carter solidaire de la partie suspendue du véhicule. La transmission est alors disposée entre la roue dentée commandant l'essieu et celui-ci.

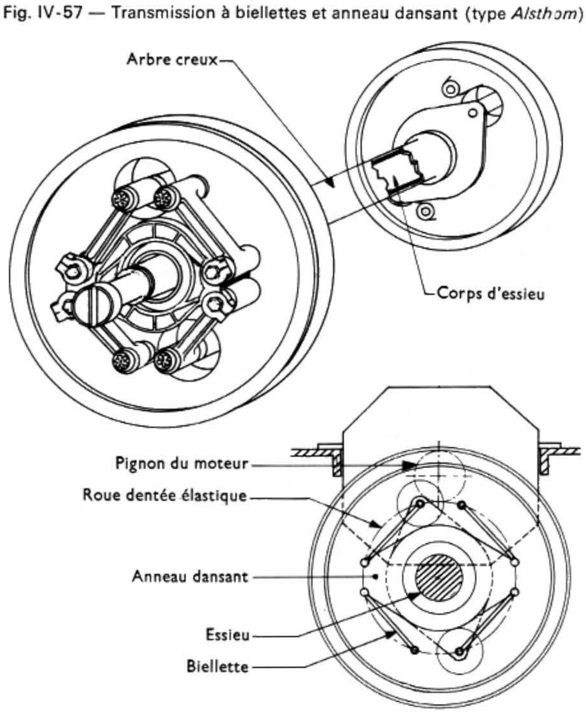
— *Transmission Büchli.* — Cette transmission est exclusivement utilisée dans le cas où les moteurs de traction et le carter des engrenages sont solidaires de la caisse. L'entraînement de chaque essieu est bilatéral et disposé généralement à l'extérieur des roues (essieux à fusées intérieures). La roue dentée principale tourillonne sur un axe solidaire de la caisse et porte le mécanisme d'accouplement (constitué de deux leviers à secteur denté et de deux bielles à rotules) qui la relie à la roue de roulement par l'intermédiaire de deux manetons portés par cette dernière (fig. IV-55). Cette transmission est en service sur de nombreuses locomotives de type 2D2. Il existe également des transmissions Büchli attaquant des essieux à fusées extérieures. Dans ce cas les roues dentées de commande des essieux sont intérieures aux roues motrices et calées sur un arbre creux entourant l'axe d'essieu et porté par le moteur de traction.

— *Transmission à ressorts et anneau flottant.* — Une couronne dentée, dont l'axe est solidaire du carter des engrenages fixé au châssis de bogie, porte des doigts prenant appui sur un jeu de coupelles à ressort. Celles-ci s'appuient à leur tour sur un anneau flottant intermédiaire qui attaque un autre jeu de coupelles, identiques aux premières, et s'appuyant sur des bras portés par le corps de l'essieu (fig. IV-56). Construite par la société S.L.M., cette transmission équipe les locomotives CC 25 001 à 9 de la S.N.C.F.

— *Transmission à anneau dansant Alsthom.* — Cette transmission est constituée de deux manetons fixés sur un plateau solidaire d'un arbre creux ou de la roue dentée principale, qui entraînent un anneau — dit anneau dansant — par l'intermédiaire de deux biellettes. Deux autres biellettes relient l'anneau à des manetons solidaires de la roue d'essieu (fig. IV-57). Les articulations des biellettes sont du type élastique à caoutchouc ce qui supprime toute lubrification. Cette transmission peut être unilatérale ou bilatérale selon la valeur du couple à transmettre. Dans le cas où elle est unilatérale, son faible encombrement permet de supprimer l'arbre creux et de la disposer à l'extérieur de l'essieu. Elle est largement répandue sur le matériel moteur moderne de la S.N.C.F. et elle équipe également certains matériels étrangers construits par la société Alsthom.

— *Transmission à cardans.* — Le couple moteur est transmis par deux manetons solidaires de la roue dentée principale à un double joint de cardan constitué par deux anneaux réunis entre eux par un arbre creux. Deux autres manetons, reliant le dernier anneau à la roue de roulement,

Fig. IV-57 — Transmission à biellettes et anneau dansant (type *Alsthom*)



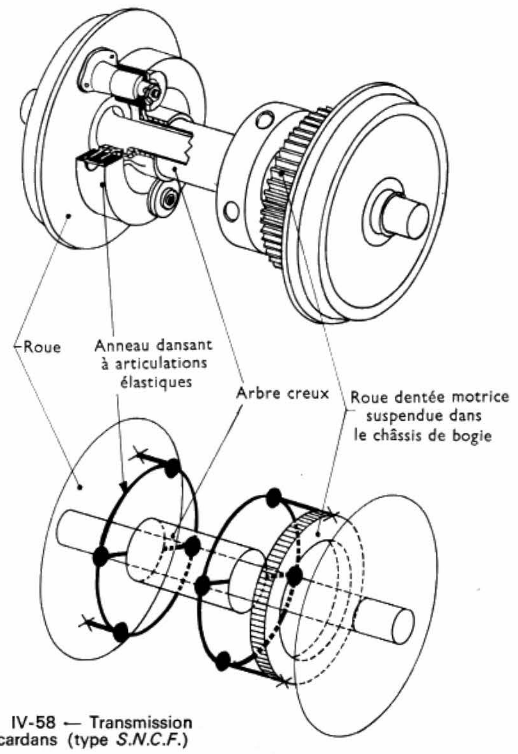


Fig IV-58 — Transmission à cardans (type *S.N.C.F.*)

assurent l'entraînement de l'essieu (fig. IV-58). Les articulations portées par les anneaux (manetons d'entraînement et arbre creux) sont réalisées au moyen d'éléments élastiques en caoutchouc (« silentblocs ») qui dispensent le système de toute lubrification.

Cette transmission, nécessairement unilatérale, permet en outre le guidage transversal de l'essieu, rôle généralement confié aux boîtes d'essieu. Elle présente également l'avantage de ne pas influer sur les caractéristiques de la suspension primaire.

Étudiée par la S.N.C.F. et réalisée d'abord pour les locomotives prototypes BB 9003 et 9004, elle équipe de nombreuses locomotives de construction française.

5.1.3. Caisse

1° *Conception.* — Les caisses d'engins moteurs, de par leur conception, peuvent être classées en trois catégories :

— caisse à châssis portant
— caisse à revêtement travaillant } dites autoportantes
— caisse à poutre triangulée }

a) *Caisse à châssis portant.* — Le châssis constitué par les longerons, les traverses de tête, des traverses extrêmes et divers entretoises et goussets subit seul les diverses sollicitations mécaniques. Les superstructures (cabines, parois latérales de caisse, lanterneaux) sont amovibles. Celles-ci n'étant pas soumises à des efforts importants peuvent être construites en alliage léger ou en matière plastique. Ce mode de construction s'impose pour les locomotives monocabine.

b) *Caisse à revêtement travaillant.* — Les parois latérales et le pavillon concourent avec le châssis à assurer la résistance de l'ensemble (fig. IV-59). La partie de toiture située entre les cabines, démontable pour permettre le montage du gros appareillage électrique (bloc rhéostat, transformateur, redresseur, etc.), est recouverte d'un ou plusieurs lanterneaux. Pour réaliser un certain équilibre de section avec le châssis et égaliser les contraintes entre les parties supérieures et inférieures, le pavillon est sérieusement renforcé.

c) *Caisse à poutre triangulée.* — L'ossature des faces latérales constituées de membrures en tôles pliées concourt avec le châssis à donner à l'ensemble une grande résistance, réduisant l'importance de la flèche que prend la caisse lors d'une opération de levage. Le revêtement des faces latérales est constitué de panneaux amovibles très légers. La masse d'une caisse nue à poutre triangulée est voisine de 0,6 à 0,7 t par mètre contre 0,8 à 0,9 t par mètre pour une caisse à revêtement travaillant.

2° *Dispositions constructives.* — Les éléments constitutifs des caisses sont construits à partir de tôles d'acier au carbone non allié (résistance à la traction $R \geqslant 42$ hbar ; limite d'élasticité $R_e \geqslant 23$ hbar ; allongement à la rupture $A \geqslant 23$ %). Dans un but d'allégement il est parfois fait appel à des aciers faiblement alliés, soudables, à limite élastique élevée ($R \geqslant 49$ hbar ; $R_e \geqslant 35$ hbar ; $A \geqslant 22$ %). Les assemblages sont réalisés uniquement par soudage électrique.

3° *Attelage.* — Les traverses de tête des caisses, aménagées jusqu'ici pour recevoir un crochet d'attelage en leur centre et deux tampons de choc latéralement, sont maintenant construites en réservant la possibilité de monter l'attelage automatique de choc et traction choisi pour équiper tout le matériel ferroviaire dans quelques années. Dans ce cas l'extrémité du châssis est calculée et aménagée pour pouvoir supporter, dans l'axe, un effort de compression maximal de 2 000 kN, qui, avec les tampons latéraux, s'exerçait pratiquement au droit des brancards.

4° *Ventilation.* — La ventilation nécessaire au refroidissement de l'équipement électrique (moteurs de traction, rhéostat, transformateur, redresseur, inductance, etc.) nécessite des débits d'air importants pouvant atteindre 20 à 22 m³/s.

La ventilation peut être indépendante, chaque appareil disposant à cet effet d'un ventilateur spécialisé, ou en série, plusieurs organes étant dans ce cas groupés dans le même circuit de ventilation.

La disposition des circuits de ventilation relève de deux techniques différentes.

a) *Caisse en surpression.* — L'air est puisé directement à l'extérieur par des conduits appropriés reliant la buse d'aspiration des ventilateurs aux orifices pratiqués dans la paroi, et, plus généralement dans le pavillon de la locomotive. Dans ce cas il est prévu la mise en surpression de la caisse pour éviter les entrées d'eau, de neige ou de poussières par les orifices résultant de défauts d'étanchéité (tuyauterie, passage de câbles, etc. ; V. fig. IV-60). Cette solution efficace nécessite toutefois des conduits assez volumineux donc lourds et onéreux.

b) *Caisse en dépression.* — Les orifices d'aspiration d'air à travers les parois de la caisse sont munis de filtres et les ventilateurs aspirent l'air directement dans la caisse créant ainsi une dépression plus ou moins importante

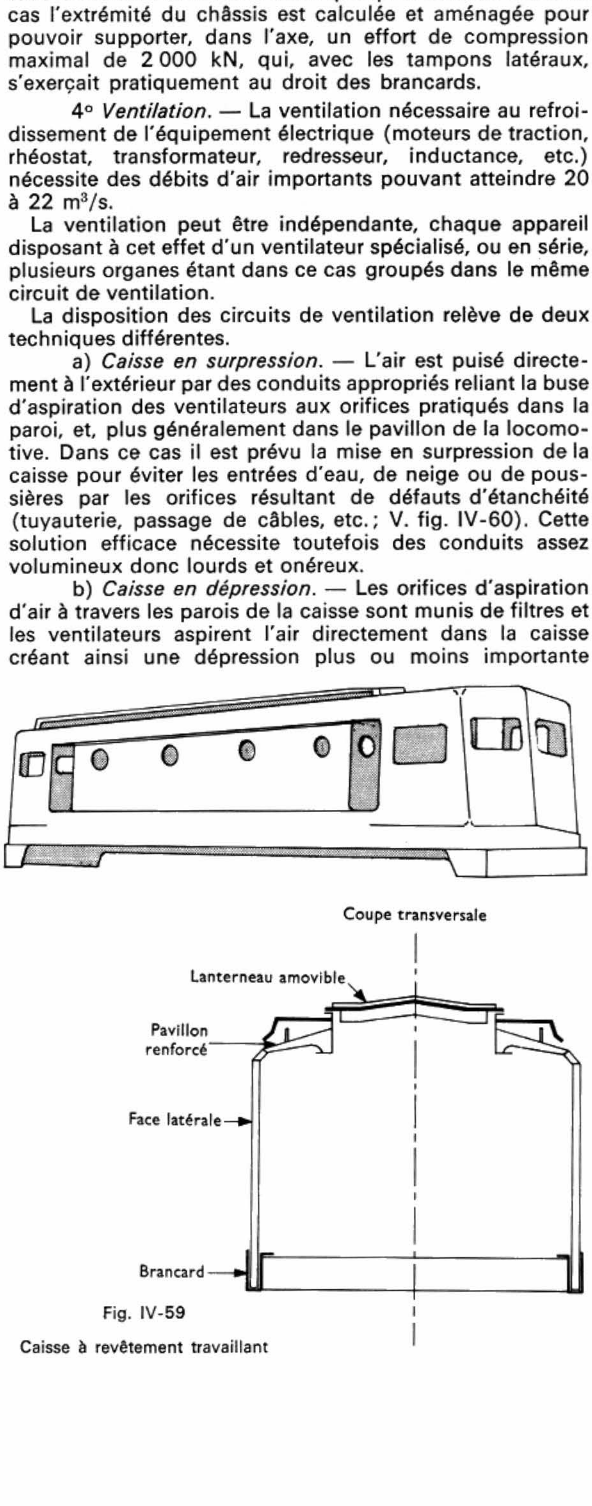
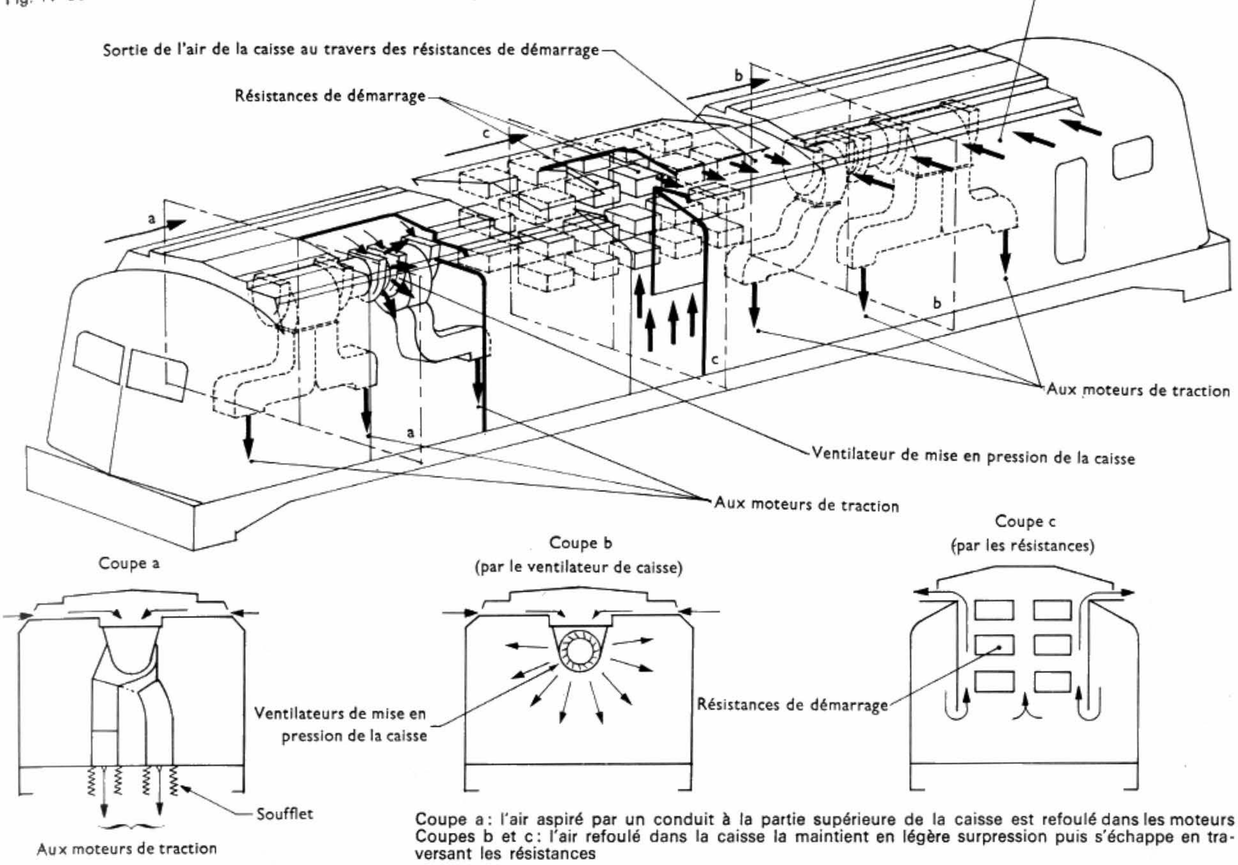


Fig. IV-59

Caisse à revêtement travaillant

Fig. IV-60 — Ventilation d'une locomotive, caisse en surpression



Coupe a : l'air aspiré par un conduit à la partie supérieure de la caisse est refoulé dans les moteurs
Coupes b et c : l'air refoulé dans la caisse la maintient en légère surpression puis s'échappe en traversant les résistances

(fig. IV-61 a et b). La filtration de l'air est assurée par des filtres « statiques » (V. fig. IV-62) constitués de matières fibreuses synthétiques, à bas prix, pouvant être mis au rebut après pollution, ou mieux, par des filtres « dynamiques » (V. fig. IV-63) ne nécessitant aucun entretien.

5.1.4. Bogies moteurs

1° *Généralités.* — Tout bogie comprend, d'une part, le train roulant en contact direct avec la voie et, d'autre part, les différents organes (châssis, engrenages, moteurs, etc.) qui s'appuient sur le train roulant par l'intermédiaire de la suspension primaire.

L'installation de la puissance motrice peut être réalisée de différentes façons. Lorsque chaque essieu est entraîné par un moteur, le bogie moteur est dit *à commande individuelle*. En revanche, un seul moteur peut entraîner plusieurs essieux accouplés : le bogie est alors dit *monomoteur*. Par ailleurs, les limites imposées par la charge maximale par essieu

Fig. IV-61 a

Ventilation d'une locomotive
Caisse en dépression

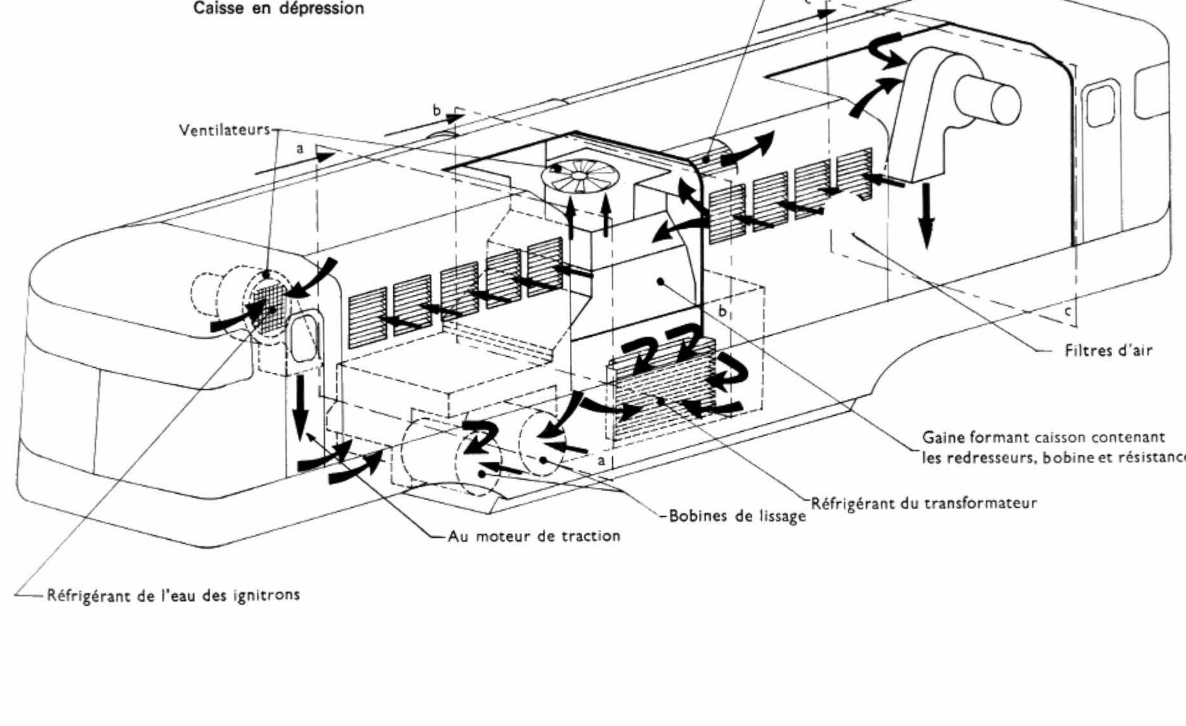
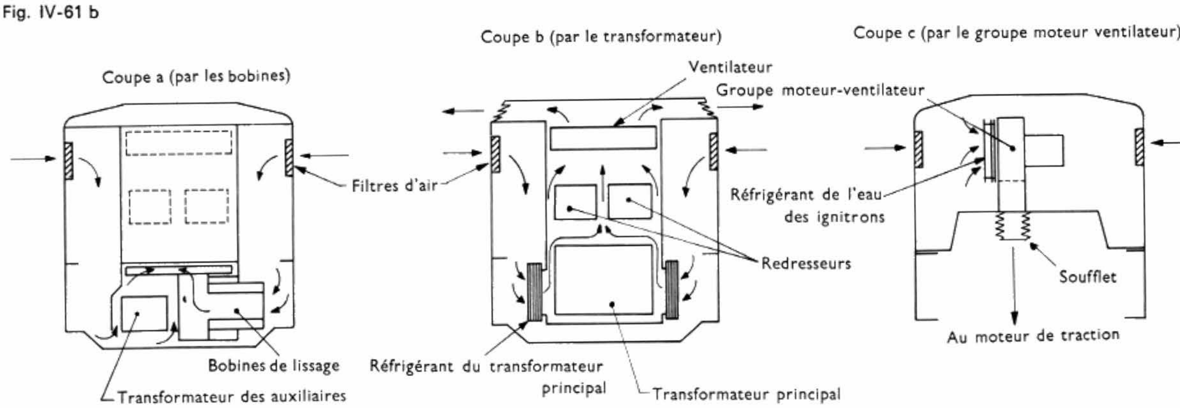


Fig. IV-61 b



Coupes a et b : ventilation de l'appareillage ; l'air aspiré dans la caisse au travers des réfrigérants du transformateur principal, des bobines de lissage et du transformateur des auxiliaires est refoulé à l'extérieur à la partie supérieure de la caisse
Coupe c : l'air aspiré dans la caisse au travers du réfrigérant de l'eau des ignitrons est refoulé dans les moteurs

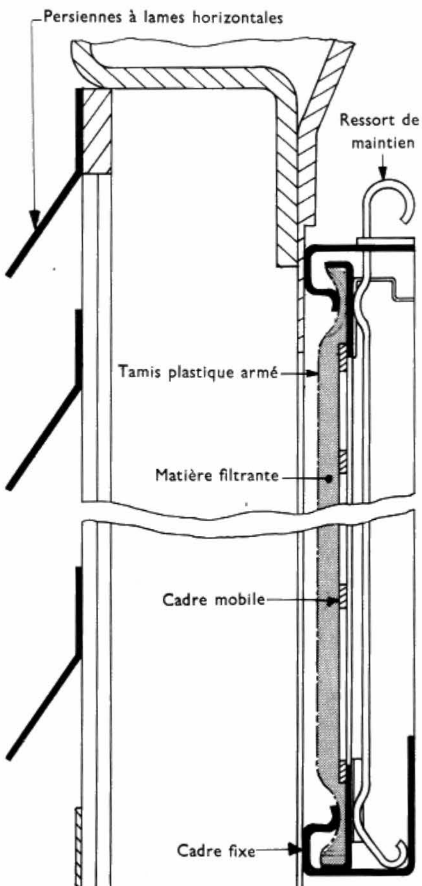


Fig. IV-62

Filtre d'air statique à matelas filtrant (coupe verticale)

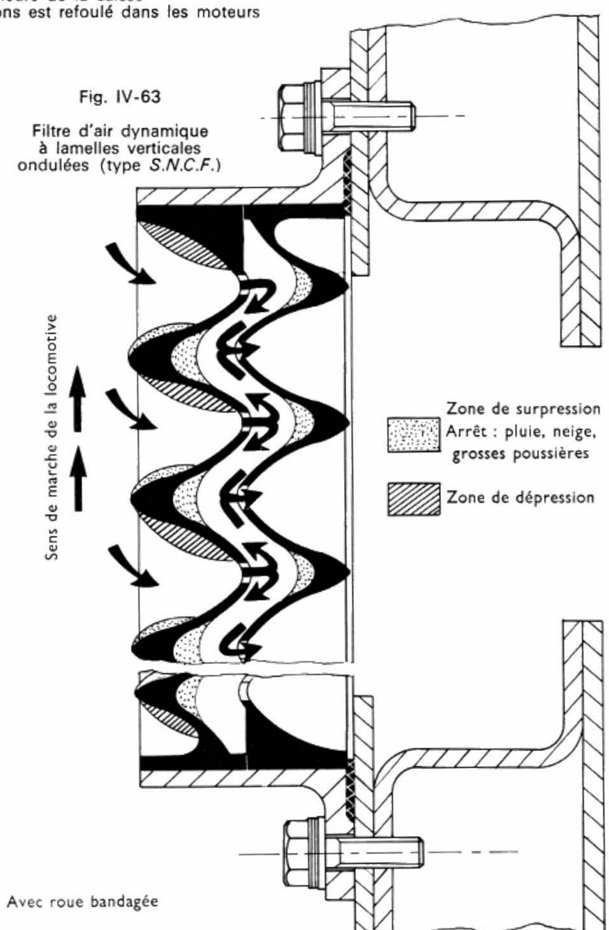
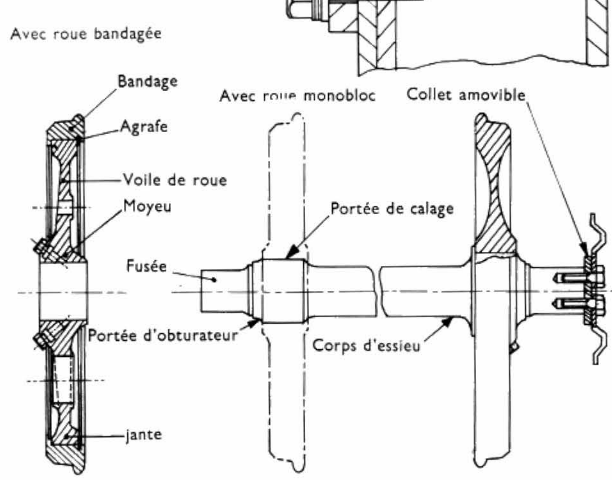


Fig. IV-63

Filtre d'air dynamique à lamelles verticales ondulées (type *S.N.C.F.*)

Fig. IV-64

Essieu monté



admise par la voie (généralement 21 t) peuvent conduire à des solutions mixtes dans lesquelles le bogie comprend également un essieu porteur (locomotives type A 1A-A1A), ou plus fréquemment à utiliser des bogies moteurs à trois essieux lorsque la puissance installée est importante.

Les bogies moteurs électriques équipent également les locomotives Diesel à transmission électrique ; on tend de plus en plus à utiliser des bogies communs aux deux modes de traction.

2° *Train roulant.* — Il est constitué par les essieux, les boîtes d'essieu et les organes liés directement à ceux-ci.

a) *Essieux* (fig. IV-64). — Ils comprennent un axe d'essieu sur lequel sont calées les roues. Celles-ci ont été longtemps munies d'un bandage placé à chaud autour de la jante. Maintenant elles sont généralement monoblocs, notamment dans le cas des locomotives à grande vitesse.

Les essieux comportent également les organes permettant d'appliquer le couple moteur, c'est-à-dire soit une ou deux couronnes dentées calées sur l'axe d'essieu, soit des manetons solidaires des roues.

b) *Boîtes d'essieu.* — Elles font office de paliers et peuvent être disposées soit entre les roues (fig. IV-65) soit à l'extérieur. Sur le matériel ancien, les boîtes d'essieu

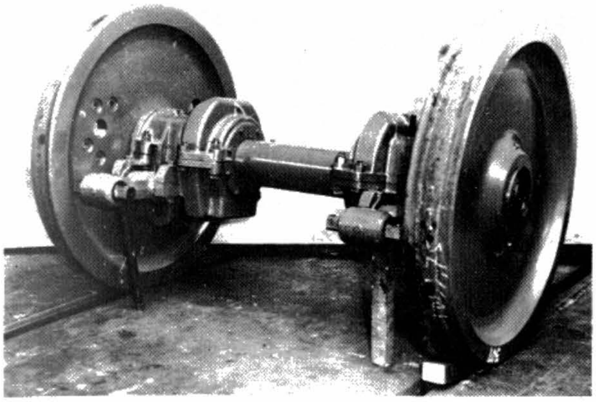


Fig. IV-65 — Essieu monté avec boîtes intérieures (*S.N.C.F.*)

sont munies d'un coussinet disposé sur la fusée du corps d'essieu. La lubrification est assurée soit au moyen de tampons graisseurs puisant l'huile dans une réserve aménagée à la partie inférieure de la boîte (fig. IV-66), soit par graissage hydrodynamique (fig. IV-67). Dans ce cas

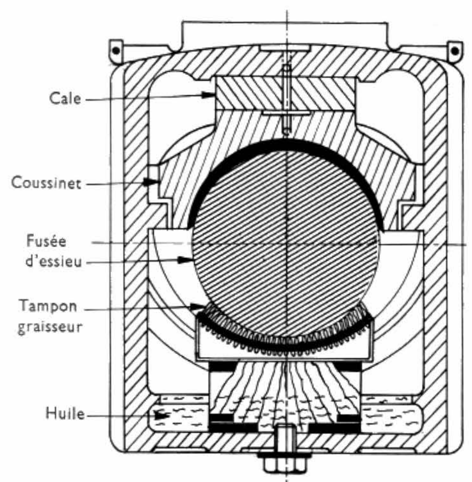


Fig. VI-66 — Boite d'essieu à coussinet et tampon graisseur

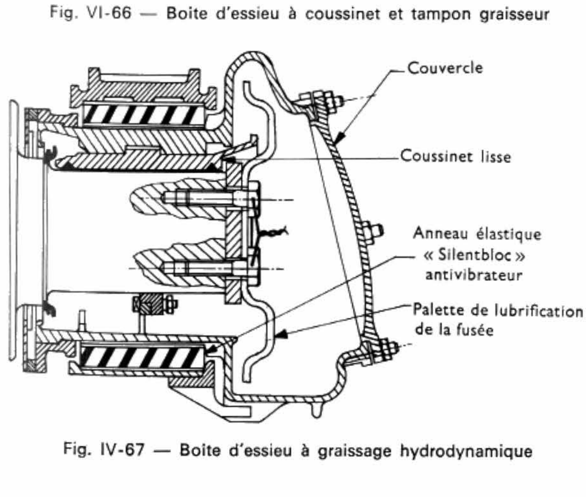


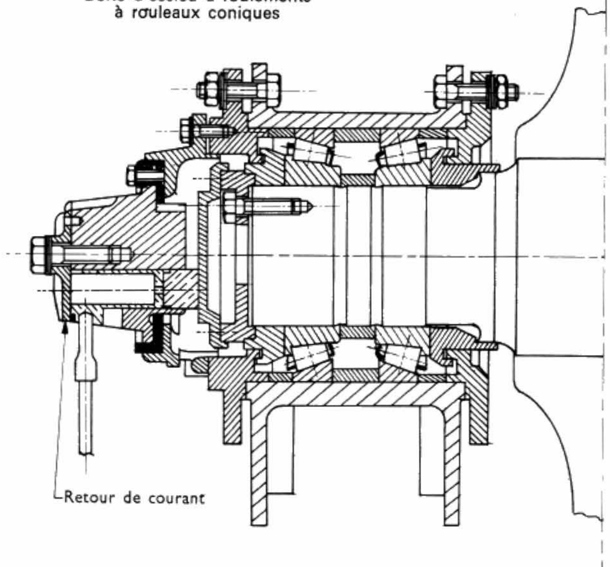
Fig. IV-67 — Boite d'essieu à graissage hydrodynamique

l'huile est amenée à la partie supérieure du coussinet au moyen d'une palette solidaire de l'axe d'essieu et plongeant dans une réserve placée à la partie inférieure de la boîte.

Le matériel moderne est équipé de roulements à rouleaux, lubrifiés à la graisse (fig. IV-68), qui présentent une meilleure tenue en service que les coussinets avec de moindres sujétions d'entretien. Enfin, la boîte d'essieu comporte quelquefois un système élastique permettant de contrôler son déplacement transversal par rapport à l'essieu. Ce dispositif peut être à ressort ou à caoutchouc.

Fig. IV-68

Boîte d'essieu à roulements à rouleaux coniques

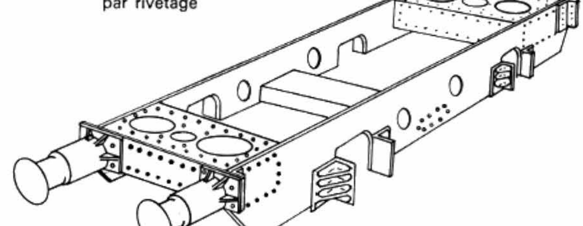


3° *Partie suspendue.* — Elle comprend le châssis de bogie, les moteurs et le carter contenant les engrenages lorsque ceux-ci sont suspendus ainsi que les organes du frein et certains dispositifs auxiliaires (graisseurs de rail, sablières, etc.).

a) *Châssis de bogie.* — Plusieurs techniques sont utilisées pour la construction des châssis de bogie. Avant que ne se développe l'assemblage par soudage électrique, les châssis étaient constitués par des longerons en tôle épaisse entretoisés par des traverses en tôles et profilés ou en acier moulé, le tout étant assemblé par rivetage (fig. IV-69). D'autres châssis de bogie étaient entièrement moulés (fig. IV-70). Ces procédés sont aujourd'hui abandonnés et tous les châssis des engins modernes sont

Fig. IV-69

Châssis de bogie assemblé par rivetage



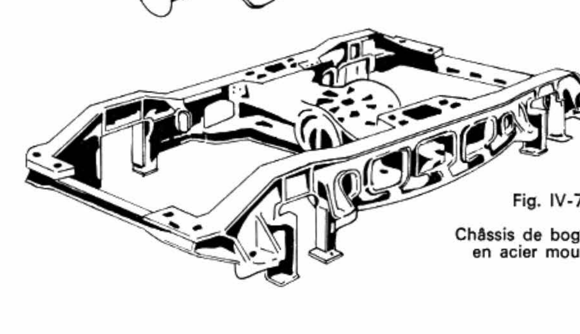


Fig. IV-70

Châssis de bogie en acier moulé

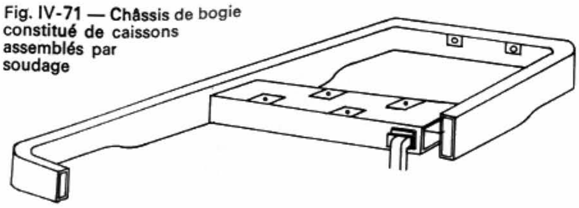


Fig. IV-71 — Châssis de bogie constitué de caissons assemblés par soudage

constitués d'éléments en tôle assemblés par soudage. Ces éléments peuvent être de simples tôles planes ou seulement pliées ; parfois ils constituent des caissons (fig. IV-71). Dans certains cas, des éléments moulés et des éléments de tôle sont assemblés par soudage pour constituer des châssis mixtes.

b) *Fixation du moteur et du carter des engrenages.* — Le carter contenant les engrenages est construit selon les mêmes procédés que les châssis. Il peut faire partie intégrante du châssis et y être assemblé par soudage, ou bien constituer un ensemble distinct aisément démontable. Les moteurs participent rarement à la résistance du châssis. Ils sont généralement posés sur des supports appropriés fixés au châssis. Dans ce cas, un accouplement élastique assure la transmission du couple au pignon moteur ; il permet d'absorber les faibles désaxements qui peuvent subsister après le montage du moteur. Dans certaines dispositions le moteur est emboîté dans le carter des engrenages.

c) *Fixation des organes de frein.* — Sur la plupart des bogies, les organes de frein sont fixés sur le châssis. Les semelles — ou sabots — sont commandées à partir du cylindre de frein par un jeu de leviers et de renvois assez complexes constituant la timonerie de frein. Pour éviter les inconvénients inhérents à cette disposition, le matériel moderne est généralement équipé de blocs de freinage indépendants dans lesquels sont groupés le cylindre, le levier porte-semelle et la semelle (fig. IV-72). Ces blocs sont fixés au droit de chaque roue, sur le châssis de bogie.

d) *Liaisons entre le train-roulant et la partie suspendue.* — Elles comprennent les organes de suspension, et les organes de guidage de l'essieu.

— *Suspension.* — Elle a pour but de répartir la masse du véhicule sur la voie et de permettre aux roues de suivre, sans variation importante de charge, les irrégularités de la voie. Longtemps réalisée au moyen de ressorts à lames, la suspension est maintenant constituée de ressorts en hélice et d'amortisseurs à friction ou hydrauliques conjugués parfois avec des éléments de caoutchouc. Les ressorts peuvent être conjugués entre eux par des balanciers pour réaliser une suspension équilibrée (fig. IV-73). Lorsque les ressorts n'intéressent qu'une boîte d'essieu, la suspension est dite individuelle (fig. IV-74). C'est cette disposition qui est adoptée pour les locomotives les plus récentes.

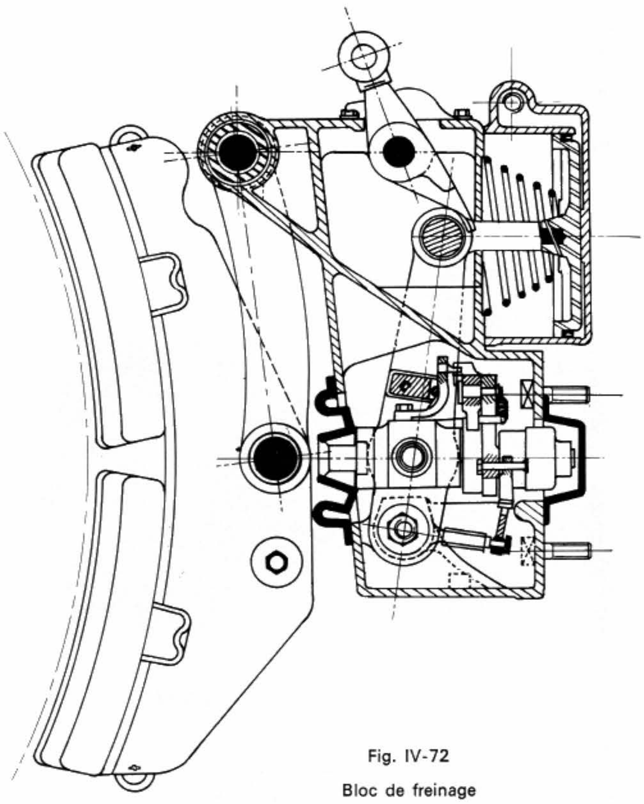


Fig. IV-72

Bloc de freinage

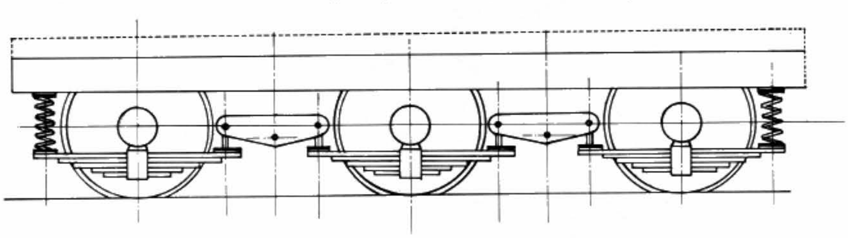


Fig. IV-73

Suspension conjuguée

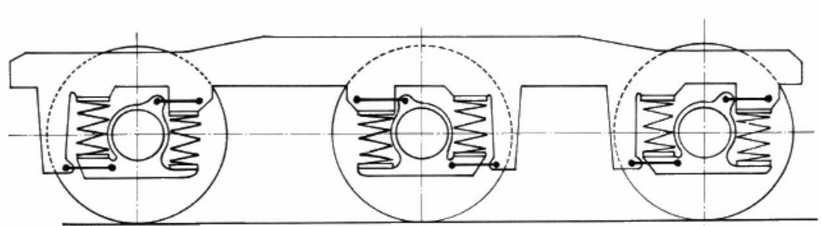


Fig. IV-74

Suspension individuelle

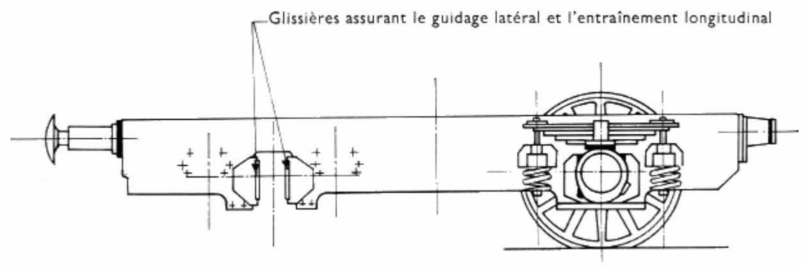


Fig. IV-75

Guidage des boîtes d'essieu par glissières verticales

— *Guidage des boîtes d'essieu.* — Généralement, le guidage transversal et l'entraînement longitudinal du châssis de bogie par l'essieu sont réalisés à l'aide des mêmes organes. Le moyen le plus ancien et le plus simple consiste à guider la boîte d'essieu au moyen de glissières verticales (V. fig. IV-75). Ce système est aujourd'hui abandonné en raison des usures, des jeux et des frottements qui se manifestent entre les pièces en contact. Dans une disposition de même principe mais de réalisation différente, fréquemment utilisée sur les bogies de construction suisse, la boîte d'essieu est maintenue au moyen de deux guides cylindriques verticaux solidaires du châssis (fig. IV-76). Les

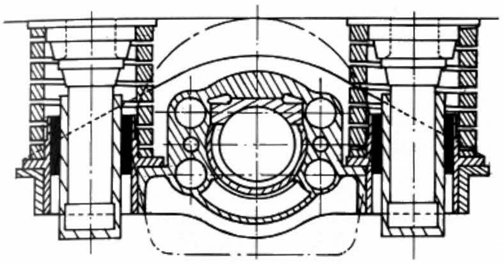


Fig. IV-76 — Guidage des boîtes d'essieu par guides cylindriques verticaux

systèmes les plus récents utilisent des bielles longitudinales reliant la boîte d'essieu au châssis (fig. IV-77). Ces bielles étant munies d'articulations élastiques, ce dispositif est sans usure puisque sans frottement.

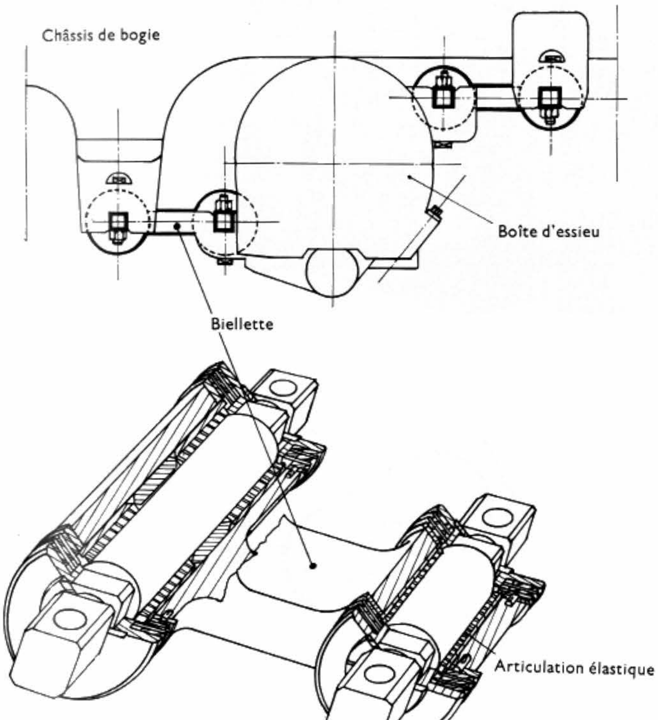


Fig. IV-77 — Guidage des boîtes d'essieu par bielles longitudinales

Dans certains bogies, le guidage transversal est indépendant de la liaison longitudinale. Dans ce cas, les boîtes d'essieu sont reliées par un balancier de suspension et l'entraînement de la partie suspendue est assuré au moyen de biellettes reliant chaque balancier au châssis de bogie. Le guidage transversal est alors assuré par la transmission elle-même.

4° *Bogies à commande individuelle d'essieu*

a) *Bogies à deux essieux.* — Il existe de nombreux types de bogies de cette catégorie parmi lesquels il convient de mentionner celui équipant les locomotives modernes BB de la S.N.C.F., à commande individuelle des essieux, pour service mixte et pour la grande vitesse (BB 12 000, 13 000, 16 000, 9 200, 9 300). Le train roulant est constitué par deux essieux et deux balanciers longitudinaux maintiennent à distance constante les boîtes d'essieu extérieures situées d'un même côté. Ces balanciers supportent la charge de la partie suspendue par l'intermédiaire de ressorts en hélice. Le châssis de bogie est construit en tôles pliées assemblées par soudage. Le carter contenant les engrenages fait partie intégrante du châssis de bogie. L'effort de traction est transmis du train roulant au châssis de bogie au moyen de deux biellettes longitudinales réunissant les balanciers à un système triangulé solidaire de la partie suspendue. Les moteurs, disposés au centre du bogie, du côté pignon, sont emboîtés dans le carter des engrenages et du côté opposé sont soutenus par une console fixée au longeron du châssis. Le couple moteur est transmis à l'essieu par l'intermédiaire d'un train d'engrenages et d'une transmission unilatérale à cardans qui assure en outre le guidage transversal de l'essieu.

b) *Bogie à trois essieux à commande individuelle d'essieu.* — Ce type de bogie est utilisé lorsque le bogie à deux essieux conduit à une masse par roue trop grande (à noter qu'une autre formule consiste à réaliser une locomotive BBB). Ce modèle de bogie se rencontre notamment sur les locomotives à grande vitesse CC 7100 de la S.N.C.F. Le train roulant comprend essentiellement les essieux et leurs boîtes extérieures à coussinets. Le châssis est construit en éléments de tôles emboutis et assemblés par soudage. Le guidage transversal des essieux par rapport au châssis est réalisé par des biellettes longitudinales à articulation en caoutchouc qui assurent également la transmission de l'effort moteur entre le train roulant et la partie suspendue. La suspension est constituée par une combinaison de ressorts à lames, de ressorts en hélice et de blocs de caoutchouc. Ces éléments sont conjugués entre eux au moyen de balanciers équilibreurs afin d'assurer une meilleure répartition de la charge.

Les moteurs, fixés sur le châssis de bogie, entraînent un arbre creux porté par des paliers solidaires de la carcasse du moteur. L'entraînement bilatéral de l'arbre creux est assuré au moyen d'engrenages élastiques. Le couple est transmis de l'arbre creux à l'essieu au moyen d'une transmission bilatérale à biellettes et anneau dansant.

5° *Bogies monomoteurs.* — Le remplacement de plusieurs moteurs de traction par un seul offre de nombreux avantages, tant du point de vue électrique que mécanique. Tout d'abord, à puissance égale, cette solution procure une réduction de masse et par conséquent de prix. À titre indicatif, pour des puissances comprises entre 2 000 et 2 500 kW, la répartition de la puissance totale entre deux moteurs au lieu de quatre apporte une réduction de près de 20 % de la masse des moteurs à laquelle il convient d'ajouter le gain résultant de la simplification du câblage et de l'appareillage électrique. En second lieu, l'accouplement mécanique des essieux résultant de la présence d'un seul moteur permet d'obtenir une meilleure adhérence globale du bogie. Par ailleurs, l'utilisation d'un moteur unique facilite l'installation d'un dispositif de changement de rapport d'engrenages qui permet d'adapter, en quelques minutes, une locomotive soit pour le service des marchandises, soit pour le service des voyageurs. Le double rapport d'engrenages élargit donc la gamme des performances de l'engin sans nécessiter l'augmentation du dimensionnement du moteur.

Le remplacement de plusieurs moteurs par un moteur unique situé sensiblement au centre du bogie réduit notablement le moment d'inertie de ce dernier par rapport à son axe vertical ; il en résulte une diminution des efforts dynamiques transversaux exercés sur la voie.

Les bogies monomoteurs comportent deux ou trois essieux. Dans tous les cas le moteur et les engrenages sont entièrement suspendus. Les transmissions du couple moteur aux essieux sont identiques à celles utilisées sur les bogies à commande individuelle des essieux.

a) *Bogies monomoteurs à deux essieux.* — Il existe des bogies monomoteurs à deux essieux avec ou sans double rapport de réduction.

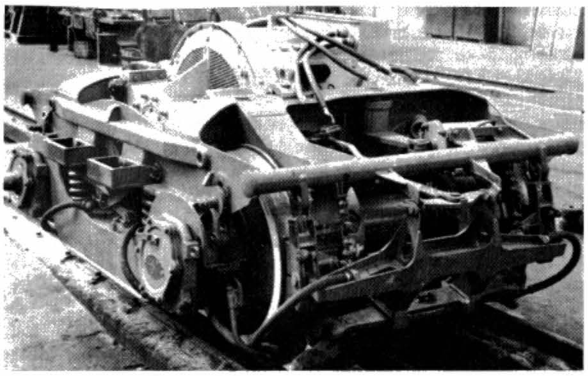


Fig. IV-78 — Bogie monomoteur monorapport à deux essieux (BB 9400) (*S.N.C.F.*)

— *Bogies monorapport* (fig. IV-78). — Ces bogies présentent de nombreuses analogies avec les bogies à deux essieux et à commande individuelle décrits précédemment. Le moteur repose sur des supports fixés sur les traverses du châssis. Le couple du pignon moteur est transmis simultanément à deux roues dentées intermédiaires qui commandent la roue dentée propre à chaque essieu. Ce type de bogie équipe les locomotives électriques BB 9400 de la S.N.C.F. Les bogies des engins plus récents, (locomotives Diesel BB 67 400 et locomotives électriques BB 15 000) présentent quelques différences constructives (suspension individuelle, guidage des boîtes d'essieu par bielles élastiques, bâti-carter amovible, etc.; fig. IV-79).

— *Bogies bi-rapport.* — Mis au point en 1958 pour les locomotives BB 16500, ce furent les premiers bogies monomoteurs utilisés par la S.N.C.F. sur le matériel moteur électrique. Le train roulant comprend deux essieux à boîtes intérieures réunies entre elles par des balanciers équilibreurs destinés à recevoir la charge de la partie suspendue de la locomotive. Le châssis de bogie, construit en éléments de tôle assemblés par soudage, reçoit le moteur de traction en son centre. La suspension est réalisée au moyen de ressorts en hélice et les essieux sont guidés par des biellettes longitudinales, à articulations en caoutchouc, reliant les boîtes d'essieu au châssis de bogie.

Le couple est transmis par un accouplement élastique au plateau de commande du pignon moteur. Ce pignon ainsi que tous les autres engrenages sont enfermés dans un carter étanche fixé latéralement au châssis de bogie et contenant également le changement de rapport de réduction à l'arrêt (fig. IV-80). Ce dispositif comprend deux trains d'engrenages à double étages attaqués simultanément par le pignon moteur et disposés symétriquement. Ils sont portés par un basculeur pivotant autour de l'axe du pignon moteur. Ce basculeur, manœuvrable par une commande disposée dans la caisse, réalise l'engrènement du second étage de l'un ou l'autre train avec la roue dentée d'accouplement des deux roues dentées de commande des essieux. Le couple est transmis aux essieux par des transmissions unilatérales à biellettes et anneau dansant.

Ce bogie équipe toutes les locomotives des séries S.N.C.F. BB 8500, 16500, 17000, 20200, 25500.

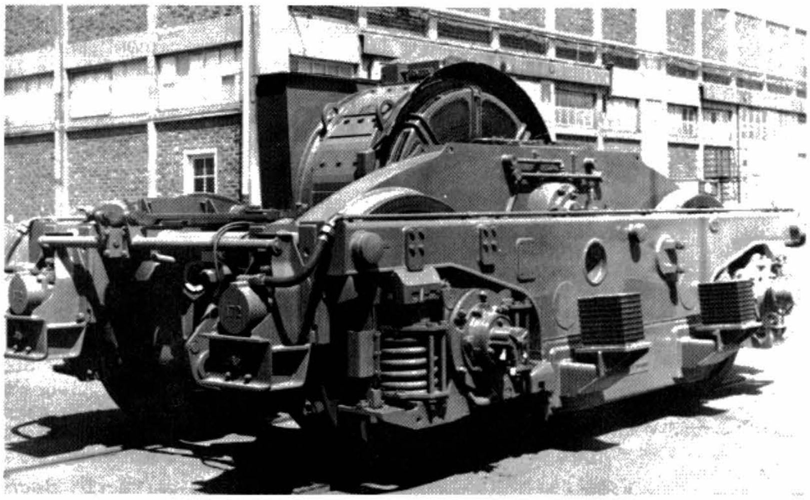


Fig. IV-79

Bogie monomoteur monorapport à deux essieux (BB 15000) (*Creusot-Loire*)

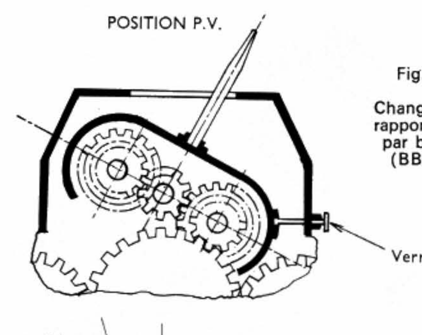
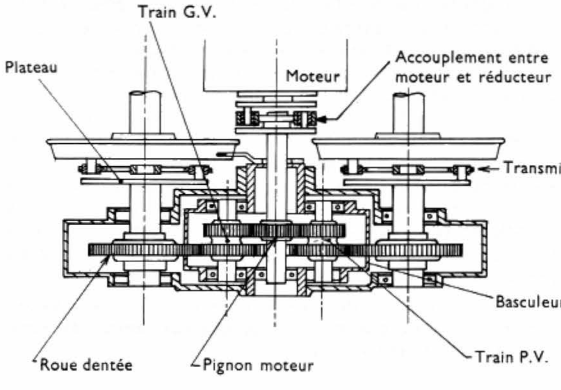
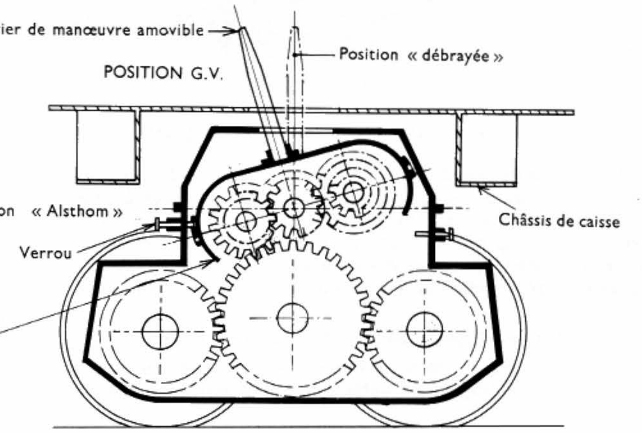


Fig. IV-80

Changement de rapport à l'arrêt par basculeur (BB 16500)





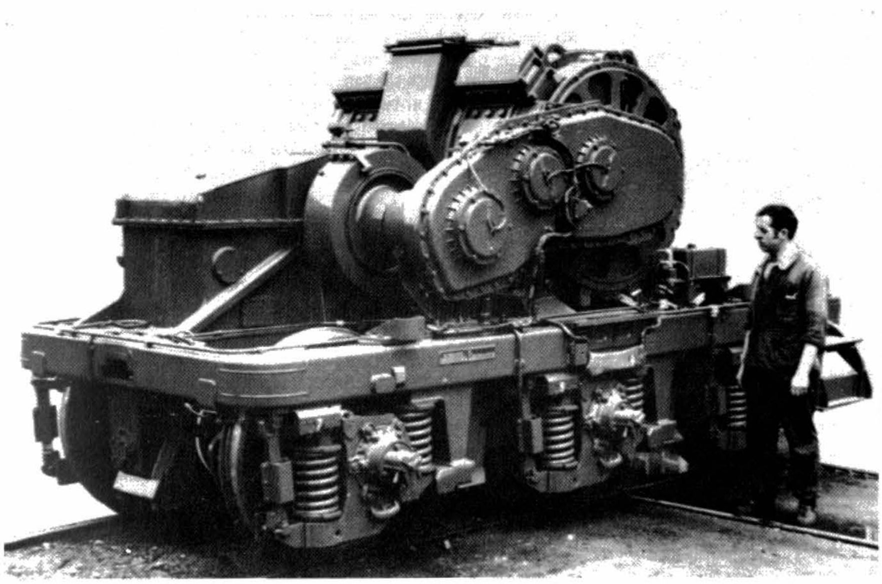


Fig. IV-81

Bogie monomoteur bi-rapport à trois essieux (locomotives CC 6500 et CC 21000) (*Creusot-Loire*)

b) *Bogies monomoteurs à trois essieux* (fig. IV-81). — Ces bogies ont été imaginés à la suite des bogies à deux essieux pour équiper des locomotives dont la masse dépassait celle permise par le diagramme BB. Ils sont munis d'un double rapport de réduction manœuvrable à l'arrêt.

Le châssis de bogie, de construction soudée, se compose essentiellement d'un cadre tubulaire en tôle épaisse solidement entretoisé, d'une part, par des traverses qui supportent le moteur de traction et, d'autre part, par le bâti-carter principal dans lequel est logé le train d'engrenages. La suspension primaire est assurée par des ressorts en hélice, situés de part et d'autre de chaque boîte d'essieu. Les essieux sont à fusées extérieures. Les boîtes d'essieu, à rouleaux coniques, sont guidées par des biellettes longitudinales à articulation en caoutchouc.

Le moteur de traction transmet son couple aux essieux par l'intermédiaire d'un accouplement antivibratoire et d'un train d'engrenages latéral à l'entrée d'un basculeur; sa manœuvre à l'arrêt permet d'utiliser l'un ou l'autre des deux rapports de réduction comme dans le cas des bogies monomoteurs à deux essieux. L'entraînement des essieux est assuré soit par des transmissions à biellettes et anneaux dansants soit par des transmissions à cardans.

Ce type de bogie équipe les locomotives électriques CC 6500 et CC 21000 de la S.N.C.F. ainsi que les locomotives Diesel CC 72000.

5.1.5. Liaisons caisse-bogie

1° *Généralités*. — Les liaisons entre la caisse et les bogies doivent assurer l'appui vertical de la caisse sur les châssis de bogie, maintenir la caisse dans l'axe des bogies lors de la circulation en alignement, permettre une rotation relative des bogies dans les passages en courbe et transmettre les efforts de traction et de freinage. Ces fonctions peuvent être assurées par des organes séparés ou être groupées partiellement ou totalement selon les dispositions adoptées.

a) *Liaisons verticales*. — En transmettant la charge de la caisse au châssis de bogie, les liaisons verticales peuvent conditionner le confort vertical de la caisse et interviennent dans le cabrage du bogie. Lorsque le système est élastique, il est appelé *suspension secondaire*. C'est fréquemment le cas du matériel remorqué dans lequel on doit assurer un bon niveau de confort. Au contraire, les locomotives ne possèdent souvent qu'une suspension primaire. L'opportunité d'une suspension secondaire dépend de l'état des voies sur lesquelles les locomotives sont appelées à circuler.

b) *Liaisons transversales*. — Elles ont pour but de contrôler les déplacements transversaux de la caisse par rapport au bogie. La masse de la caisse ne doit pas être liée rigidement à celle du bogie sous peine de voir apparaître des efforts transversaux importants sur la voie. La liaison doit présenter une certaine élasticité; cependant les caractéristiques du rappel élastique doivent être telles qu'il ne risque pas d'apparaître de résonance entre le mouvement de lacet du bogie et la caisse. Pour satisfaire à cette condition la fréquence propre transversale de la caisse doit être inférieure à 1,5 Hz. Cela nécessite des liaisons relativement peu rigides avec possibilité d'un mouvement relatif caisse-bogie assez important pour éviter, entre ces deux organes, des chocs générateurs d'efforts transversaux importants. Ces liaisons élastiques sont réalisées par ressorts, par gravité ou par des éléments de caoutchouc et sont souvent groupées avec les éléments assurant l'appui de la caisse.

c) *Rotation du bogie*. — L'axe de rotation du bogie peut être matérialisé par un pivot mais bien souvent le matériel moderne ne comporte pas de pivot et le bogie prend la position voulue grâce à la liberté ménagée par les liaisons transversales avec la caisse.

Pour assurer une bonne stabilité en ligne à grande vitesse, il est nécessaire de prévoir un amortissement du mouvement de rotation du bogie par rapport à la caisse. Le couple ainsi créé, appelé *couple antilacet*, possède généralement les caractéristiques d'un couple de frottement. Il est obtenu soit par des appuis latéraux glissants sur lesquels s'exerce une partie ou la totalité de la charge de la caisse, soit au moyen d'amortisseurs disposés longitudinalement, de chaque côté du bogie, et reliant le châssis du bogie à la caisse.

d) *Liaisons longitudinales*. — Elles transmettent les efforts de traction et de freinage entre la caisse et le bogie.

Sur certaines anciennes séries de locomotives les organes de choc et d'attelage sont disposés sur les châssis de bogies. Dans ce cas, la liaison longitudinale des bogies avec la caisse ne supporte que les forces d'inertie provenant des accélérations longitudinales exercées sur la caisse; les bogies sont attelés entre eux pour assurer la transmission de l'effort moteur au crochet de traction.

Dans la majorité des cas, les organes de choc et de traction sont placés sur les traverses extrêmes du châssis de caisse. Les liaisons longitudinales doivent alors transmettre l'effort moteur. De plus, elles ont une très grande influence sur le cabrage du bogie, phénomène provoqué par le couple dû à l'effort de traction exercé à la jante des roues, et la réaction absorbée par le dispositif de liaison avec la caisse. Ce couple entraîne un déchargement de l'essieu placé à l'avant, dans le sens de marche, et une surcharge de l'essieu arrière. Ces variations de charge sont extrêmement gênantes du point de vue de l'adhérence, en particulier au démarrage, lorsque le couple moteur est maximal. Le cabrage est d'autant plus important que le point où s'exerce l'effort d'entraînement entre caisse et bogie est élevé au-dessus du rail. Différentes dispositions mécaniques permettent d'annuler ou d'atténuer considérablement les effets

de cabrage. Les plus utilisés sur le matériel de la S.N.C.F. consistent à maintenir le châssis de bogie parallèle au châssis de la caisse, ou à reporter le point où s'exerce l'effort de traction au niveau du rail (ou à une faible distance au-dessus).

2° *Liaisons par pivot réel*

a) *Cas des bogies libres.* — La solution consistant à faire reposer la caisse sur le bogie par un simple pivot plan disposé sur une traverse centrale du châssis de bogie ne se rencontre que sur le matériel ancien.

b) *Cas des bogies attelés* (fig. IV-82). — La caisse repose sur chaque bogie par un pivot central généralement sphérique et par des équilibreurs latéraux élastiques sur lesquels sont reportés 25 ou 30 % de la masse de la caisse. Un des deux pivots est rendu mobile longitudinalement afin de permettre les déplacements relatifs des deux bogies attelés lors du passage en courbe.

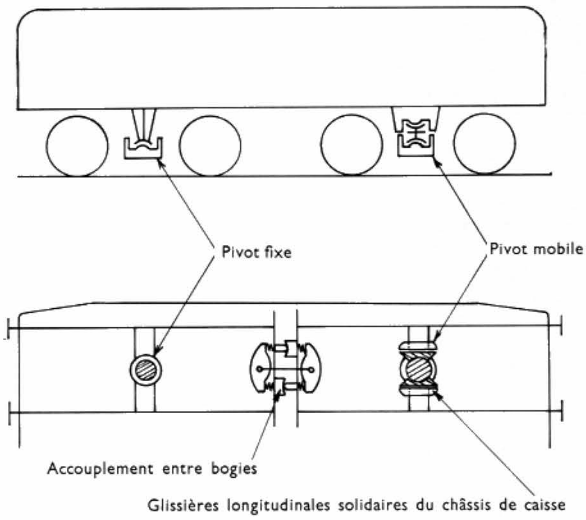


Fig. IV-82 — Locomotive à bogies accouplés; entraînement de la caisse

3° *Liaisons par double pivots oscillants* (fig. IV-83). La caisse repose sur chaque bogie par l'intermédiaire de deux pivots oscillants; quatre appuis latéraux élastiques supportent une partie du poids de la caisse et la maintiennent horizontale. Les pivots doubles peuvent s'incliner dans le plan transversal grâce à des cônes de caoutchouc faisant office de rotules. Le rappel transversal de la caisse est obtenu au moyen de bielles élastiques tendant à maintenir chaque pivot en position verticale. La liberté transversale procurée par les deux systèmes disposés sur chaque bogie leur permet de s'orienter correctement dans les courbes. Les appuis latéraux élastiques fixés à la caisse créent un couple antilacet par leur frottement sur les plaques de glissement solidaires du châssis de bogie. Les pivots oscillants assurent également l'entraînement de la caisse au moyen de butées prenant appui sur le châssis de caisse. La présence des deux pivots maintient le châssis de bogie pratiquement parallèle à celui de la caisse et empêche ainsi le cabrage du bogie.

Ce type de liaison équipe de nombreuses locomotives dont les CC 7100 et une partie des BB 16500 de la S.N.C.F.

4° *Liaisons avec suspension pendulaire* (V. fig. IV-84). La caisse est supportée au-dessus de chaque bogie par deux bielles appelées *bielles pendulaires* qui sont suspendues aux extrémités d'une traverse de charge. Celle-ci, maintenue orthogonale à l'axe longitudinal de la caisse, repose sur le châssis de bogie par l'intermédiaire de deux patins prenant appui sur des plaques de glissement — ou *lisoirs* — fixés au châssis de bogie. Des guides longitudinaux maintiennent transversalement les patins par rapport au châssis de bogie. Le bogie peut ainsi pivoter librement par rapport à la traverse. Le couple de frottement engendré par le glissement des patins sur les lisoirs maintenus dans un bain d'huile, fait office de couple antilacet. Le rappel transversal de la caisse par rapport au bogie est obtenu par des bielles pendulaires. Ce système présente l'avantage de permettre un rappel par gravité pratiquement indéréglable. Seul le frottement des axes d'articulation des bielles, qui normalement suffit à amortir les oscillations, varie avec l'état des pièces en contact. La transmission de l'effort moteur est assurée au moyen de barres de traction reliant le châssis de caisse à la partie inférieure du châssis de bogie. L'obliquité donnée à ces barres permet de reporter au niveau du rail le point d'entraînement de la caisse par rapport au bogie et ainsi d'annuler le couple de cabrage de ce dernier.

Ces dispositions se rencontrent sur les locomotives modernes BB de la S.N.C.F., à commande individuelle des essieux pour service mixte et pour la grande vitesse (BB 12000, 13000, 16000, 9200, 9300).

Sur certains engins équipés de bogies monomoteurs, la présence du moteur au centre du bogie oblige à supprimer la traverse de charge. Les bielles pendulaires sont alors suspendues à des balanciers longitudinaux s'appuyant, par l'intermédiaire de patins analogues à ceux de la traverse, sur

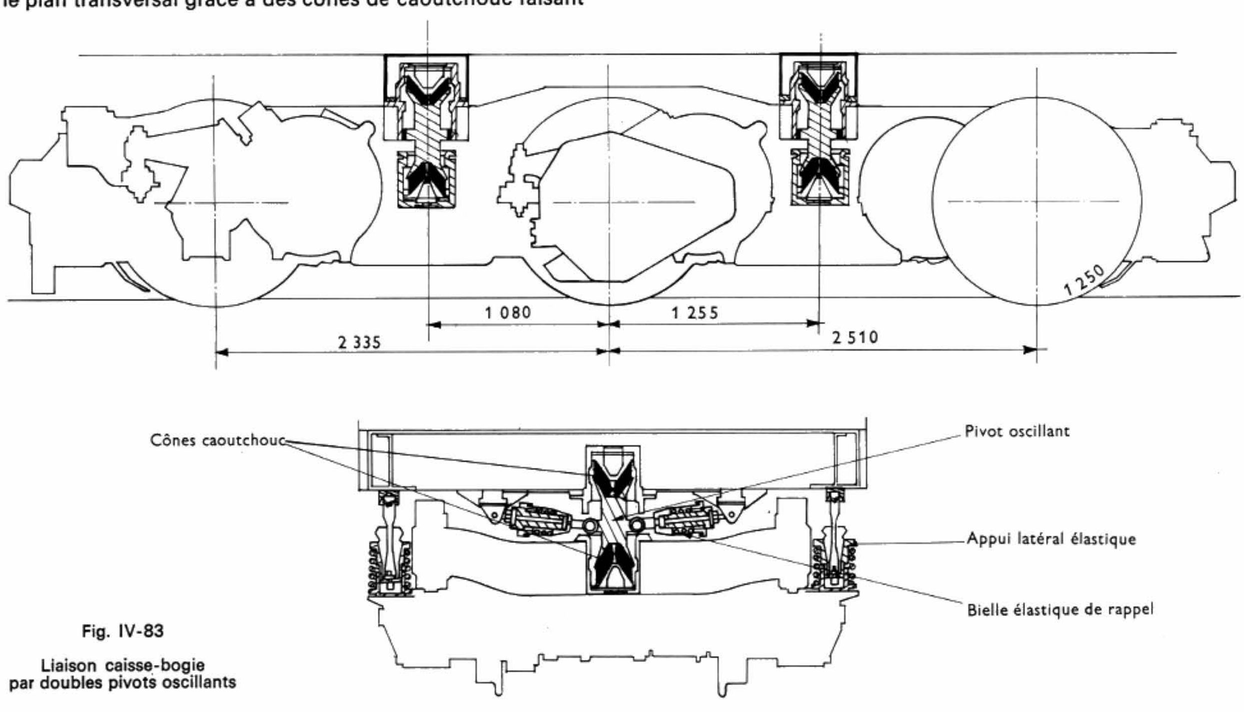


Fig. IV-83

Liaison caisse-bogie par doubles pivots oscillants

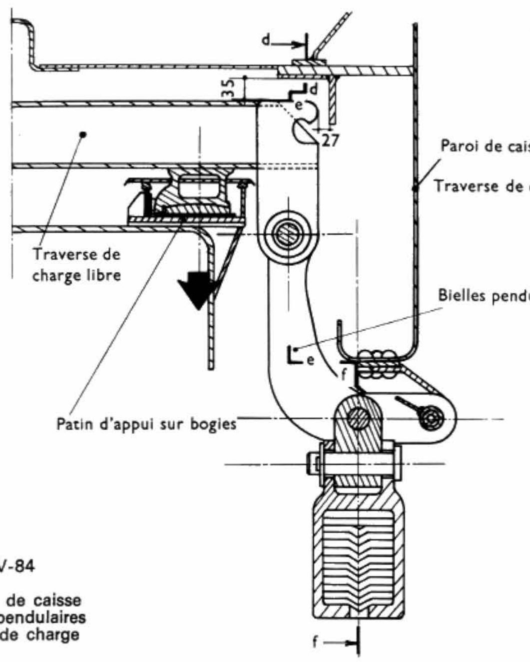


Fig. IV-84

Suspension de caisse par bielles pendulaires et traverse de charge

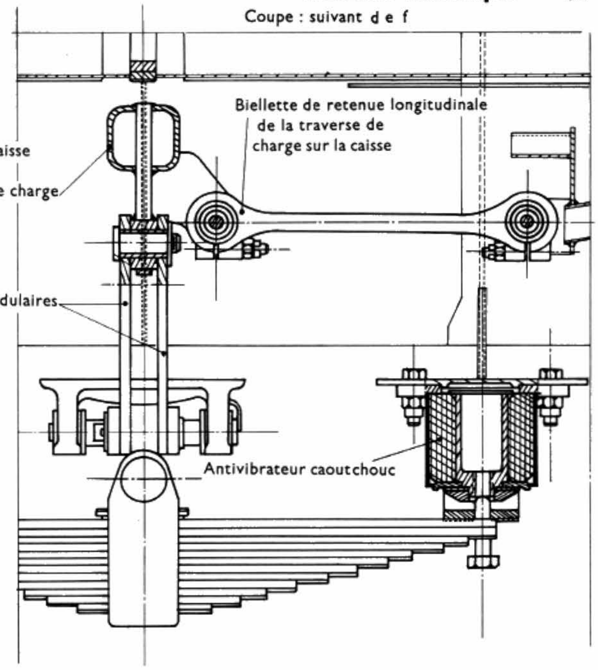


Fig. IV-86 — Suspension de caisse par blocs « sandwich »

des lisoirs latéraux fixés au châssis de bogie. Cette disposition légèrement différente conduit aux même types de liaison (fig. IV-85).

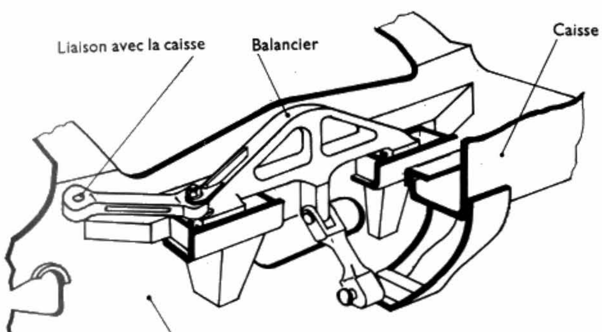
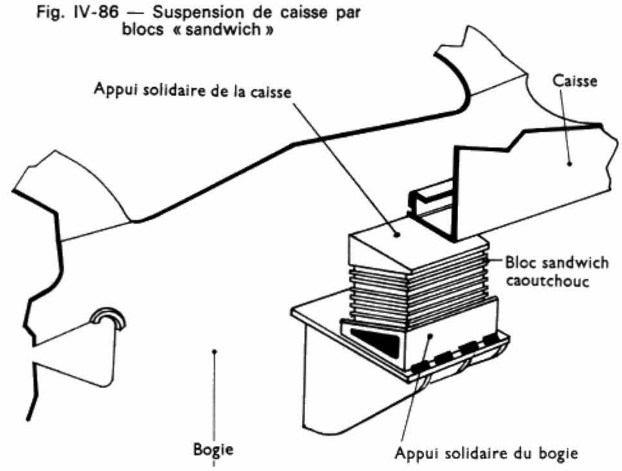


Fig. IV-85 — Suspension de caisse par bielles pendulaires et balanciers longitudinaux



5° *Liaisons avec sandwiches caoutchouc* (fig. IV-86). L'emploi de sandwiches caoutchouc pour réaliser l'appui de la caisse sur le châssis de bogie est le plus récent des systèmes utilisés. Les blocs élastiques employés sont constitués de lames métalliques entre lesquelles est moulé le caoutchouc. Ils possèdent une très grande rigidité dans le sens perpendiculaire aux plaques et des caractéristiques élastiques qui, dans les autres sens, dépendent de leurs dimensions et du nombre de couches de caoutchouc. La caisse repose sur le bogie par l'intermédiaire de ces blocs qui sont généralement disposés de chaque côté du châssis du bogie. Ils assurent le rappel transversal de la caisse et contrôlent la rotation du bogie en exerçant un couple de rappel élastique sur ce dernier. Ce couple n'est cependant pas suffisant pour assurer le freinage des mouvements de lacet du bogie et l'amortissement propre du caoutchouc étant pratiquement nul, il est nécessaire de disposer des amortisseurs pour créer un couple antilacet. La transmission de l'effort moteur est assurée par des barres de traction comme dans le cas des locomotives équipées d'une suspension pendulaire.

Les sandwiches caoutchouc présentent l'avantage de simplifier considérablement la disposition mécanique des liaisons caisse-bogie et permettent d'obtenir un meilleur confort de la caisse du point de vue acoustique. Leurs caractéristiques sont très constantes et les mouvements relatifs entre la caisse et le bogie n'entraînent aucun frottement parasite. Cette absence de frottement conduit souvent à utiliser, en plus des amortisseurs antilacets, des amortisseurs transversaux. L'amortissement transversal peut alors être défini avec une meilleure précision que dans le cas où il dépend uniquement de frottements propres aux systèmes utilisés.

Toutes les locomotives récemment construites pour la S.N.C.F. sont équipées de sandwiches caoutchouc pour assurer l'appui et le rappel transversal de la caisse (locomotives électriques BB 15000, CC 6500, 21000, 40100, locomotives Diesel BB 67 400 et CC 72 000).

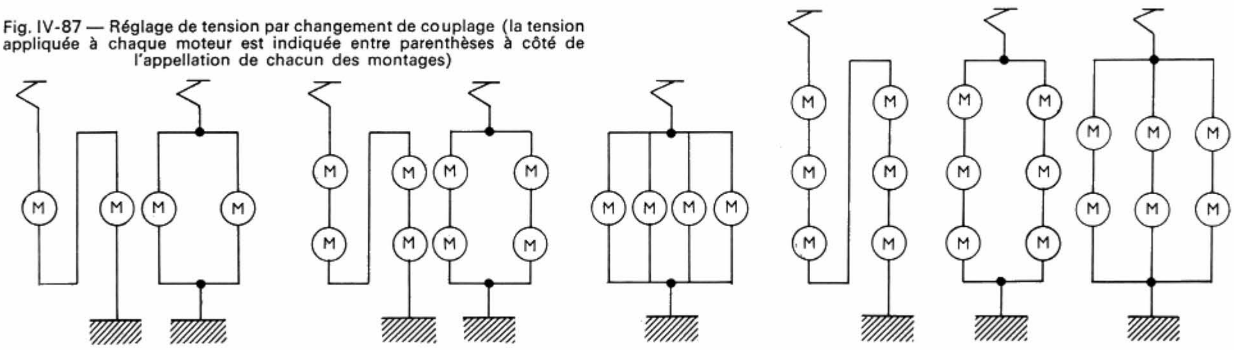
5.2. Partie électrique des locomotives à courant continu

5.2.1. Réglage de la vitesse. — La vitesse d'un moteur à courant continu peut être modifiée en agissant sur l'un des deux facteurs suivants : tension appliquée et champ inducteur. Les deux possibilités sont exploitées sur les locomotives à courant continu.

1° *Réglage de la tension appliquée aux moteurs de traction*

a) *Réglage par changement de couplage et rhéostat.* Différents couplages des moteurs de traction permettent de soumettre chacun d'eux soit à la totalité, soit à une fraction de la tension de la caténaire (V. fig. IV-87). À chaque couplage correspond une courbe effort-vitesse de fonctionnement de la locomotive (V. fig. IV-88). Pour un même effort exercé, les vitesses de la locomotive aux différents couplages sont sensiblement dans le rapport des tensions appliquées aux moteurs. La limitation du courant au

Fig. IV-87 — Réglage de tension par changement de couplage (la tension appliquée à chaque moteur est indiquée entre parenthèses à côté de l'appellation de chacun des montages)



Deux moteurs « pleine tension » :
a) Couplage série $\left(\frac{U}{2}\right)$
b) Couplage parallèle (U)

Quatre moteurs « pleine tension » :
a) Couplage série $\left(\frac{U}{4}\right)$
b) Couplage série-parallèle $\left(\frac{U}{2}\right)$
c) Couplage parallèle (U)

Six moteurs « demi-tension » :
a) Couplage série $\left(\frac{U}{6}\right)$
b) Couplage série-parallèle $\left(\frac{U}{3}\right)$
c) Couplage parallèle $\left(\frac{U}{2}\right)$

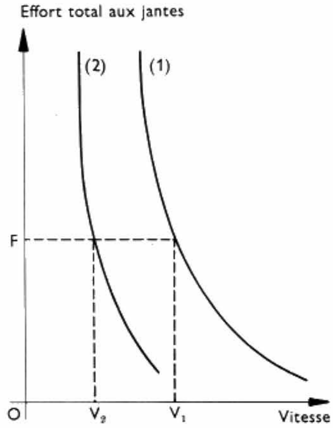


Fig. IV-88

Caractéristiques effort-vitesse obtenues avec deux couplages :
— pour tension U aux bornes des moteurs ;
— pour tension $\left(\frac{U}{2}\right)$ aux bornes des moteurs
Dans ces conditions : $\frac{V_2}{V_1} \simeq \frac{1}{2}$

démarrage est assurée au moyen d'un rhéostat, qui est progressivement éliminé tandis que la vitesse croît. À chaque valeur de rhéostat correspond une nouvelle caractéristique effort-vitesse (fig. IV-89).

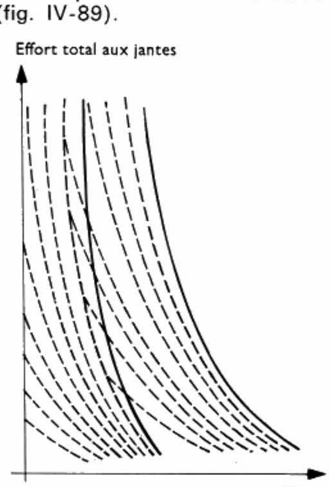


Fig. IV-89

Caractéristiques effort-vitesse obtenues avec deux couplages et utilisation d'un rhéostat

b) *Réglage de tension par hacheur* (*ou « chopper »*). Grâce aux progrès réalisés en matière d'électronique de puissance, il est possible, depuis quelques années seulement, de réaliser des hacheurs permettant d'assurer le réglage de la tension appliquée à chaque moteur de traction. Un hacheur est un interrupteur statique qui, périodiquement, établit et supprime la liaison entre caténaire et moteur (fig. IV-90).

Si la tension en amont du hacheur est U_e, la période de récurrence des fermetures T et la durée des fermetures t_f, la tension moyenne en aval du hacheur est :

$$U_{moy} = U_e \frac{t_f}{T}$$

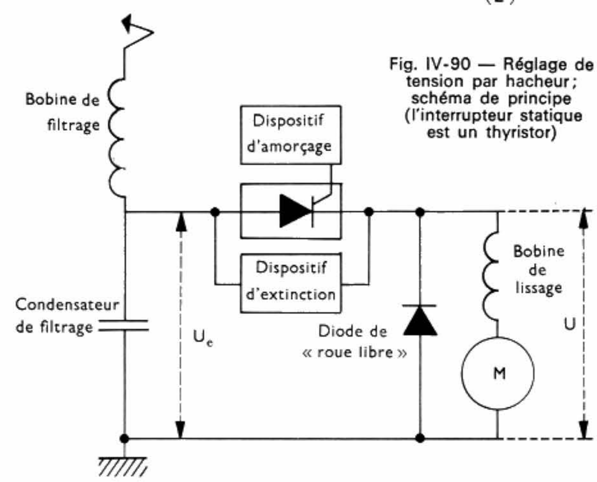
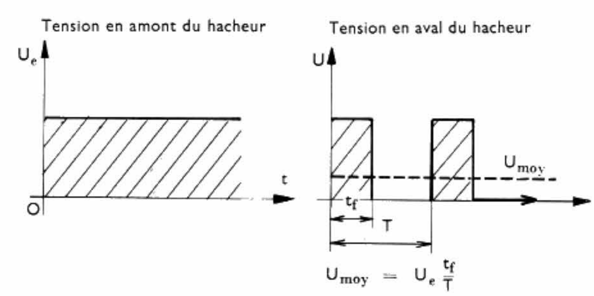


Fig. IV-90 — Réglage de tension par hacheur ; schéma de principe (l'interrupteur statique est un thyristor)



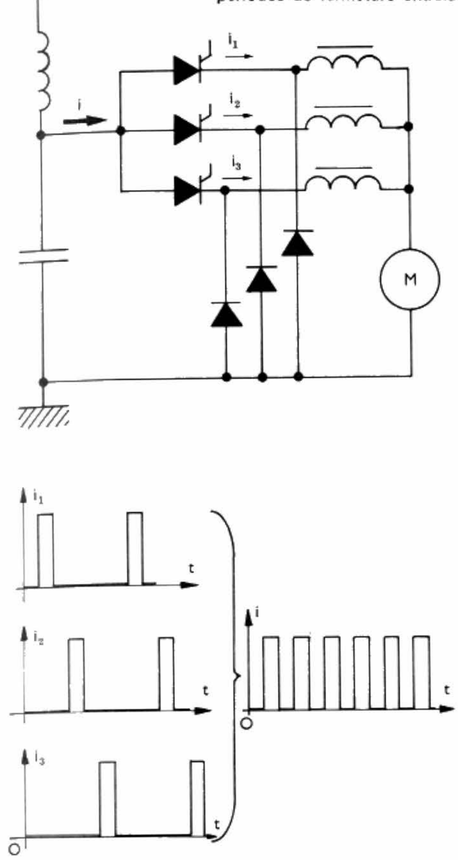
Deux modes de fonctionnement sont possibles :

— à fréquence fixe : avec une période T constante et une durée t_f des fermetures variable ;

— à fréquence variable : avec une période T variable et une durée t_f des fermetures constante.

Dans les deux cas le hacheur est équivalent à un transformateur à rapport variable. Bien que la tension, à la sortie du hacheur, soit discontinue, le courant est ininterrompu dans le moteur car l'inductance de celui-ci et surtout, en général, une inductance de lissage, assure la prolongation du courant qui se boucle à travers des diodes dites « de roue libre » ou de déversement. Ainsi le moteur est traversé par un courant d'ondulation modérée (30 % par exemple). Pour « lisser » le courant appelé à la caténaire et pour faciliter le fonctionnement du hacheur, un filtre est disposé en amont ; il comporte une batterie de condensateurs formant réservoir d'énergie et une inductance qui remédie à l'irrégularité de l'inductance de ligne. Le filtre est moins utile lorsqu'on utilise plusieurs hacheurs avec entrelacement (fig. IV-91). La fréquence de travail du filtre est alors multipliée par le nombre des hacheurs qui, eux,

Fig. IV-91 — Réglage de tension par trois hacheurs à périodes de fermeture entrelacées



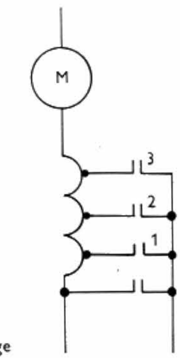


Fig. IV-92

Réduction de champ par réduction du nombre de spires

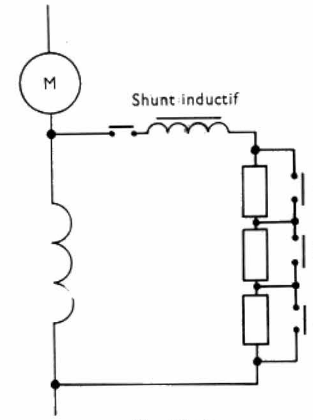


Fig. IV-93

Shuntage des inducteurs par résistances et shunt inductif

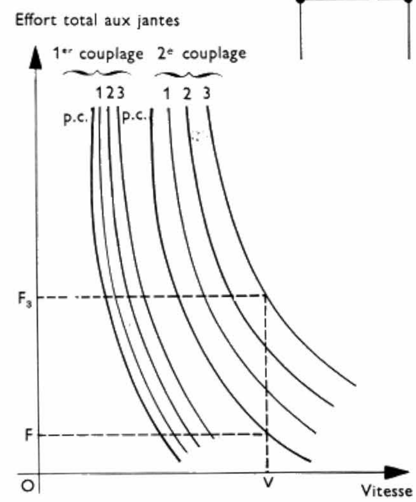


Fig. IV-94 — Caractéristiques effort-vitesse obtenues par réduction de champ
p.c. : caractéristiques à plein champ
1, 2, 3 : caractéristiques à champ réduit
$\frac{F_3}{F} \approx \frac{1}{\tau_3}$ (avec τ_3 : taux d'excitation au dernier cran de shuntage)

fonctionnent à une fréquence permise par les thyristors de puissance (jusqu'à 300 ou 400 Hz).

Les thyristors, redresseurs contrôlés en semiconducteur, sont amorcés à volonté par injection d'un faible courant entre leur électrode de commande et leur cathode. Mais lorsqu'ils sont alimentés sous une tension continue ils ne peuvent se bloquer que si le courant principal est réduit à une valeur presque nulle par une cause extérieure. Leur emploi sous tension continue, dans les hacheurs en particulier, exige donc un dispositif d'extinction. L'élément essentiel en est toujours un condensateur : chargé pendant la conduction du hacheur, il est connecté à point nommé aux bornes des thyristors auxquels il impose une polarité « inverse » (anode négative-cathode positive) en même temps qu'il dérive le courant, ce qui provoque leur blocage. Les commutations de circuits sont ainsi assurées par des éléments statiques. Les hacheurs permettent un réglage continu de la tension et par conséquent une variation également continue de l'effort moteur.

2° *Réglage de l'excitation des moteurs de traction*

a) *Réglage discontinu de l'excitation.* — Le réglage discontinu de l'excitation s'opère par la réduction du nombre de spires inductrices ou par le shuntage des pôles principaux au moyen des résistances.

Le premier procédé nécessite seulement quelques contacteurs qui assurent la mise hors circuit de spires inductrices (fig. IV-92). En contrepartie, elle complique le moteur dont les bobines polaires doivent être fractionnées, avec sortie des prises intermédiaires. Le second consiste à connecter (par fermeture d'un contacteur) des résistances en parallèle sur les inducteurs, afin qu'elles dérivent une fraction du courant (fig. IV-93). Cette solution est la plus fréquemment employée car elle permet d'augmenter le nombre des crans de shuntage sans compliquer la construction du moteur.

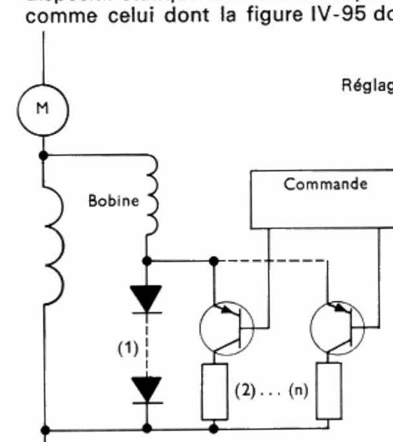
Lors de tout rétablissement brusque de la tension après coupure passagère (c'est notamment le cas lors d'un décollement de pantographe), le rétablissement du flux inducteur doit être très rapide pour que la f.é.m. du moteur puisse limiter la montée du courant dans l'induit et éviter une réaction d'induit excessive se traduisant finalement par un flash (V. § 5.2.2, 6°). Le shuntage des inducteurs par une résistance pure ne permet pas de satisfaire à cette condition : dénuée d'inductance, la résistance offre un chemin préférentiel aux courants transitoires, de sorte que les variations du courant inducteur ne sont pas calquées sur celles du courant d'induit. L'addition d'une inductance dite « shunt inductif », en série avec les résistances de shuntage, remédie à ce défaut.

Le réglage de l'excitation des moteurs procure des caractéristiques effort-vitesse supplémentaires (fig. IV-94), qui permettent de développer des efforts plus intenses aux grandes vitesses. À vitesse déterminée, pour des taux d'excitation différents, les efforts sont sensiblement en rapport inverse des taux d'excitation. La puissance dépensée dans les résistances de shuntage étant négligeable (0,1 à 0,2 % de celle des moteurs), les crans de marche à champ réduit sont des crans économiques utilisables à chacun des couplages des moteurs.

b) *Réglage continu de l'excitation.* — Le shuntage des inducteurs du moteur série peut être assuré par un dispositif statique utilisant des thyristors ou des transistors, comme celui dont la figure IV-95 donne le principe. Dans

Fig. IV-95

Réglage continu de l'excitation, d'un moteur série



(1) Chaîne de diodes limitant la tension aux bornes des transistors
(2)...(n) Transistors de shuntage

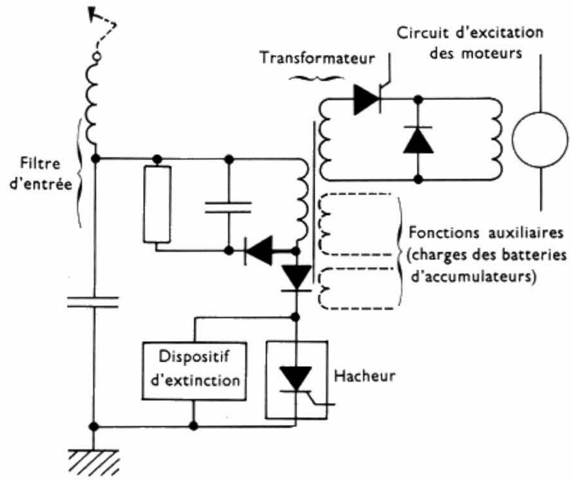


Fig. IV-96 — Excitation indépendante de moteur de traction assurée par convertisseur statique

ce cas le passage de la caractéristique effort-vitesse à plein champ à la caractéristique effort-vitesse à champ minimal se fait de façon continue et non plus cran par cran. L'excitation séparée des moteurs de traction peut également être utilisée, surtout en association avec le réglage continu de la tension. Un convertisseur statique, dont la figure IV-96 donne un exemple, fournit alors le courant d'excitation.

3° *Comparaison entre réglage discontinu et réglage continu de la tension et de l'excitation des moteurs.* — La locomotive à réglage de tension par changement de couplage et rhéostat n'a que deux ou trois domaines d'utilisation économique : ceux du réglage d'excitation à chacun des couplages (fig. IV-97). Plus exactement, sauf exception, on obtient un certain nombre (six ou huit par exemple) de caractéristiques effort-vitesse par réglage discontinu de l'excitation (V. § 5.2.2). À courant moyen donné le point de fonctionnement se déplace suivant un trajet en dents de scie, tant lors du réglage d'excitation que lors du réglage de tension par rhéostat. Les pertes rhéostatiques varient largement selon le service assuré. Leur ordre de grandeur, rapporté à la consommation au pantographe, peut être comprise entre 1,5 % pour la remorque de trains rapides de grands parcours et environ 17 % dans un service de banlieue aux arrêts fréquents. La locomotive à hacheur est toujours utilisée économiquement. Avec le réglage statique de l'excitation le point de fonctionnement se déplace d'une manière continue dans tout le domaine d'utilisation.

D'une façon générale, les systèmes statiques, par le fait qu'ils permettent le réglage continu de l'effort de traction, améliorent les conditions d'utilisation de la locomotive ; ils donnent notamment la possibilité d'atteindre presque la limite d'adhérence des roues et facilitent l'utilisation d'automatismes tels que régulateurs de vitesse et dispositifs d'antipatinage. De plus, ils simplifient l'entretien du matériel.

4° *Freinage électrique.* — En freinage électrique, les moteurs de traction sont utilisés en génératrices et ils transforment l'énergie cinétique du convoi en énergie électrique.

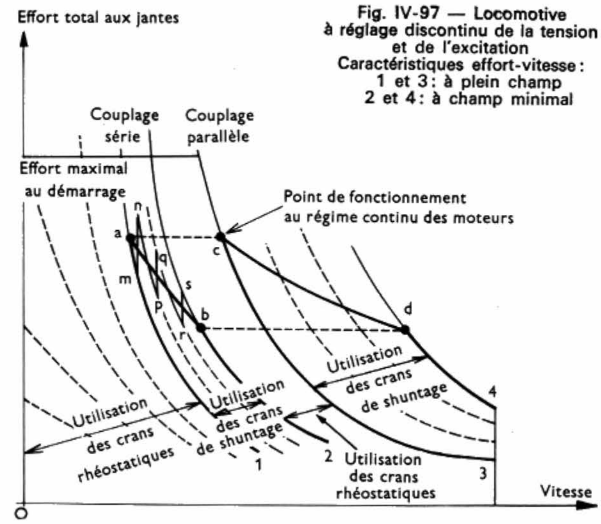
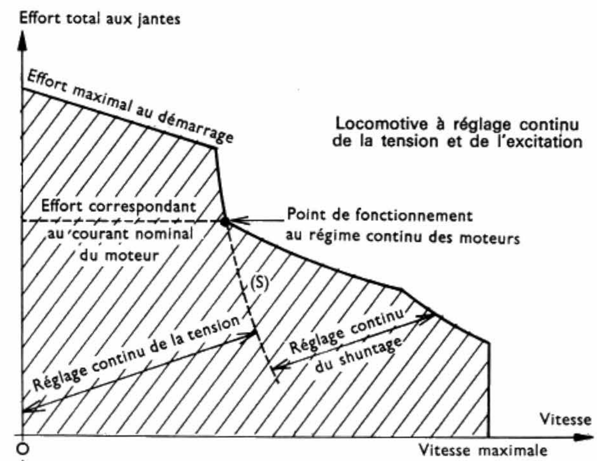


Fig. IV-97 — Locomotive à réglage discontinu de la tension et de l'excitation
Caractéristiques effort-vitesse :
1 et 3 : à plein champ
2 et 4 : à champ minimal

Le trajet a m n p q r s b représente le passage de la caractéristique plein champ à la caractéristique à champ minimal à courant constant



Celle-ci est soit dissipée dans des résistances à bord de l'engin moteur : c'est le freinage rhéostatique, soit renvoyée au réseau de distribution : c'est le freinage par récupération.

a) *Freinage rhéostatique*

— *Locomotives utilisant un rhéostat en traction.* — L'équipement « traction » est réutilisé pour le freinage. *L'excitation série* des moteurs peut être conservée ; le sens de branchement des inducteurs par rapport à l'induit doit toutefois être inversé pour qu'il y ait renforcement du flux rémanent à l'apparition du courant (fig. IV-98). Si deux moteurs débitent en parallèle dans la même résistance, la stabilité du couplage est assurée (fig. IV-99) soit par connexion d'équilibre, soit par croisement des inducteurs ou disposition équivalente comme le branchement des moteurs en tête-bêche (fig. IV-100). Le réglage de l'effort

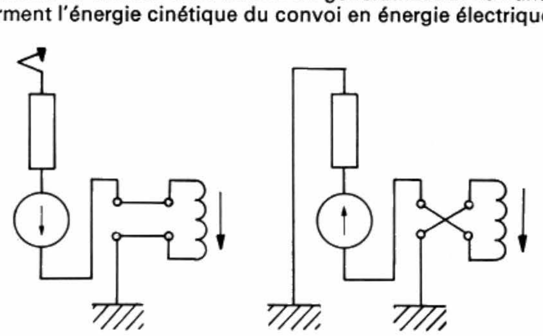


Fig. IV-98 — Schémas comparés en traction et en freinage rhéostatique (pour un moteur)

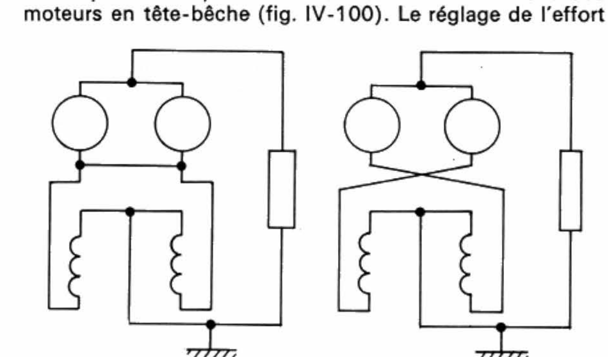
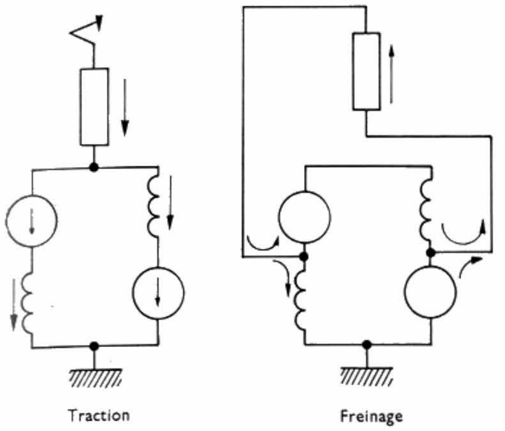


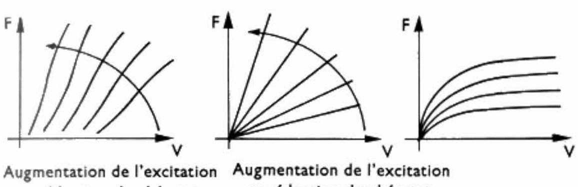
Fig. IV-99 — Stabilisation des génératrices fonctionnant en parallèle



(Le passage d'un mode à l'autre se fait sans manœuvre d'inverseur)

Fig. IV-100 — Schéma avec branchement tête-bêche des moteurs

de retenue s'effectue en modifiant le taux de shuntage des moteurs et la valeur du rhéostat. Le réseau de caractéristiques effort-vitesse se présente comme indiqué à la figure IV-101. Certaines dispositions permettent de faciliter l'amorçage du freinage rhéostatique et de lui donner plus de maniabilité :



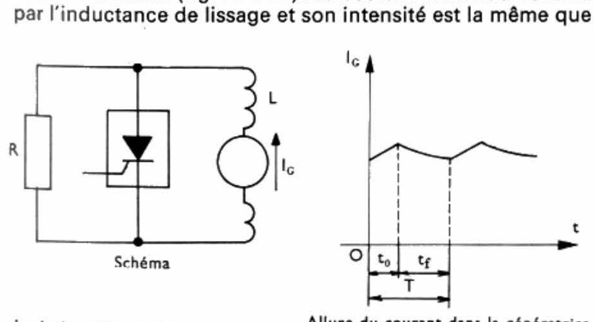
Excitation série — Excitation séparée — Excitation anti-compound

Fig. IV-101 — Caractéristiques effort-vitesse en freinage rhéostatique

- *Préexcitation :* un courant d'excitation séparée fournie par des accumulateurs favorise l'auto-excitation des moteurs au début du freinage.
- *Excitation séparée* qui donne un réseau de caractéristiques en éventail ; l'excitation, fournie par un groupe tournant ou par un convertisseur statique, peut être réglée très progressivement.
- *Excitation anti-compound* qui se traduit par une augmentation de l'inclinaison des caractéristiques ce qui rend le freinage plus facile.

Le freinage rhéostatique permet d'obtenir un effort de retenue appréciable jusqu'à très faible vitesse et si l'élimination du rhéostat est poussée presque jusqu'au court-circuit des moteurs.

— *Locomotives à équipement hacheur.* — Il est nécessaire de disposer d'une résistance qui n'est utilisée qu'en freinage ; le hacheur est connecté à ses bornes et le moteur débite dans l'ensemble (fig. IV-102). Le courant est rendu continu par l'inductance de lissage et son intensité est la même que



L : inductance de lissage
t_0 : durée des ouvertures du hacheur
tf : durée des fermetures
T : période de récurrence

Valeur équivalente de la résistance : $R\frac{T - t_f}{T}$

Fig. IV-102 — Freinage rhéostatique avec hacheur

si la résistance était égale à $r_a = r\frac{T - t_f}{T}$ en appelant r sa valeur vraie, t_f la durée des fermetures du hacheur et T la période de récurrence. La valeur apparente r_a de la résistance est donc modulée au moyen du hacheur.

L'auto-excitation des moteurs peut être utilisée mais l'addition d'une préexcitation ou l'emploi de l'excitation séparée facilitent la mise en action du freinage et sa stabilisation.

Le hacheur et l'excitation peuvent être pilotés automatiquement de façon à maintenir l'effort de retenue à une valeur de consigne presque jusqu'à l'arrêt.

b) *Freinage par récupération*

— *Locomotives dotées d'un équipement à rhéostat pour la traction.* — L'excitation « série » des moteurs ne peut être utilisée car elle donnerait des caractéristiques à pente négative (comme en traction), donc un freinage instable. L'excitation séparée conduit à un réseau de caractéristiques effort-vitesse presque rectilignes (fig. IV-103).

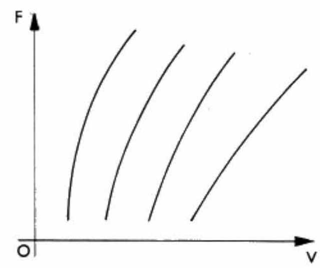


Fig. IV-103 — Caractéristique effort-vitesse en freinage par récupération (excitation séparée)

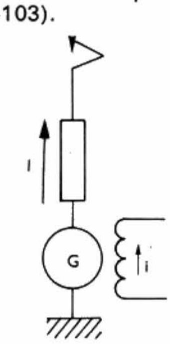


Fig. IV-104

Freinage par récupération avec résistance tampon

L'insertion d'une résistance tampon dans le circuit de débit (fig. IV-104) atténue les variations de courant, et par conséquent d'effort, provoquées par les variations de la tension de ligne.

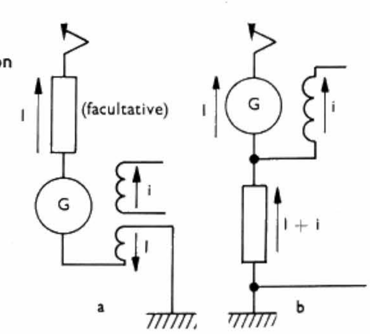
La stabilité de l'effort de retenue peut être améliorée par l'une des dispositions suivantes (fig. IV-105 a, b et c) :

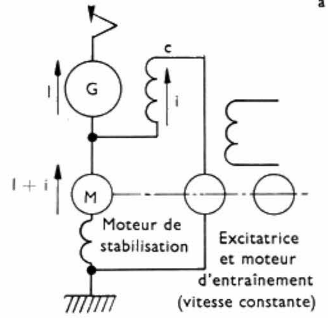
- enroulement anti-compound sur les génératrices ou sur l'excitatrice,
- résistance de stabilisation commune aux circuits de débit et d'excitation,
- moteur de stabilisation remplaçant cette résistance. Il s'agit d'un moteur série non saturé assujetti mécaniquement par le groupe d'excitation à tourner à vitesse constante.

Fig. IV-105

Procédés de stabilisation du freinage par récupération

a) avec enroulement anticompound
b) avec résistance de stabilisation





c) avec moteur de stabilisation (f.é.m. proportionnelle à I+i)

Ces différents procédés de stabilisation ont pour effet d'incliner les caractéristiques effort-vitesse ce qui améliore la maniabilité du freinage. Le freinage par récupération est inutilisable aux basses vitesses car la f.é.m. des moteurs est alors inférieure à la tension de ligne.

— *Locomotives dotées d'un hacheur.* — Pour le passage de traction en freinage, le hacheur et les diodes de « roue libre » sont permutés (fig. IV-106). La continuité du

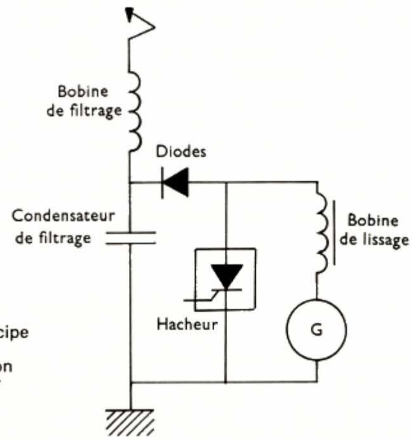


Fig. IV-106

Schéma de principe du freinage par récupération avec hacheur

courant débité par le moteur est assurée par la bobine de lissage, et le hacheur module la f.c.é.m. opposée au moteur. U étant la tension de la caténaire, t_f la durée des fermetures du hacheur et T la période de récurrence, la f.c.é.m. moyenne est égale à :

$$U \frac{T - t_f}{T}$$

L'auto-excitation complétée par une préexcitation, peut être utilisée car le hacheur permet d'asservir le courant à une valeur de consigne. Cependant, l'excitation séparée facilite l'entrée en action et la régulation du freinage qui peut être maintenu presque jusqu'à l'arrêt.

c) *Utilisation du freinage électrique sur les locomotives à courant continu.* — À lui seul, le freinage électrique ne permet pas d'obtenir l'arrêt des trains sur les distances usuelles mais il complète efficacement le freinage pneumatique, auquel il est nécessairement ajouté si les vitesses pratiquées dépassent 160 km/h environ. Il permet de ménager les sabots de frein et plus encore les surfaces de roulement des roues qui subissent des contraintes thermiques importantes lors des freinages énergiques. Comme indiqué précédemment, le freinage rhéostatique procure un effort de retenue même aux très basses vitesses. Pour qu'il en soit de même avec le freinage par récupération il est nécessaire de recourir à un équipement à hacheur ; dans le cas contraire ce freinage est essentiellement un moyen de maintien de la vitesse utilisable sur les longues pentes où il est intéressant du point de vue énergétique. Le freinage par récupération ne peut être pratiqué qu'avec tension en ligne et il demande un équipement de sous-stations permettant le renvoi d'énergie au réseau. Le freinage rhéostatique est indépendant de la tension caténaire si l'excitation est du type série (auto-excitation) ou assurée par une batterie d'accumulateurs. Il peut alors être utilisé *en toute sécurité* pour compléter le freinage pneumatique.

5.2.2. Moteurs de traction. — Les caractéristiques propres du moteur à excitation série sont parfaitement bien adaptées à la traction. Aux problèmes de réalisation et de fonctionnement communs à tous les moteurs à collecteur s'ajoutent, pour un moteur de traction, des conditions particulières : limitations très strictes de masse et d'encombrement, tenue aux vibrations et chocs provenant du roulement, tenue des isolants en contact avec des enroulements dont la température peut varier entre — 20 et + 220 °C.

1° *Définitions.* — La définition des grandeurs caractéristiques d'un moteur de traction fait appel à la notion de régime continu et de régime unihoraire.

Le *régime continu* d'un moteur est celui qu'il peut supporter pendant un temps illimité sous la tension nominale et dans les conditions normales de ventilation sans que les limites d'échauffement fixées pour la classe d'isolation considérée soient dépassées.

Le *régime unihoraire* est celui qu'un moteur froid au début de l'essai peut supporter pendant une heure à la tension nominale et dans les conditions normales de ventilation, sans que les limites d'échauffement fixées pour la classe d'isolation considérée soient dépassées.

Quels que soient le régime de définition et la classe d'isolation considérés, l'échauffement limite du collecteur, mesuré au thermomètre électrique, est fixé à 105 °C.

Le régime continu est défini par les valeurs nominales du courant, de la vitesse et de la puissance. La vitesse nominale est celle à partir de laquelle la locomotive peut développer sa puissance nominale. Pour l'utilisateur il est donc intéressant d'avoir un moteur de vitesse nominale faible, mais, à puissance égale, cela conduit à des moteurs plus lourds.

2° *Évolution des moteurs.* — L'augmentation des charges remorquées et des vitesses de circulation des trains nécessite des engins de traction de puissance de plus en plus grande. La puissance massique des moteurs de traction

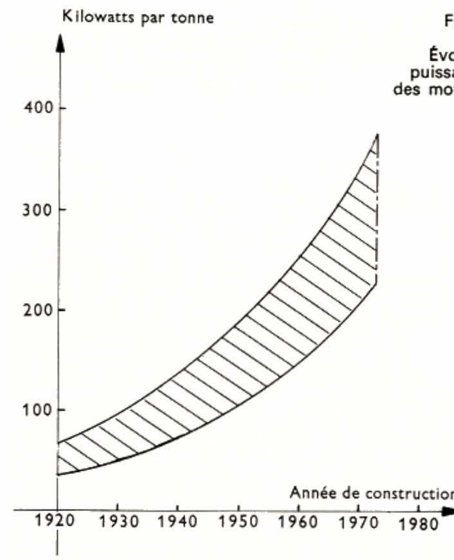


Fig. IV-107

Évolution de la puissance massique des moteurs de traction

est passée de 50 kW/t en 1928 à 350 kW/t en 1970 (fig. IV-107). Cette évolution s'est traduite par l'augmentation :

— des dimensions des moteurs, permise par l'apparition des bogies monomoteurs. Dans un moteur, seule la masse des parties actives est liée directement à la puissance ;

— de la vitesse de rotation : les moteurs modernes fonc-

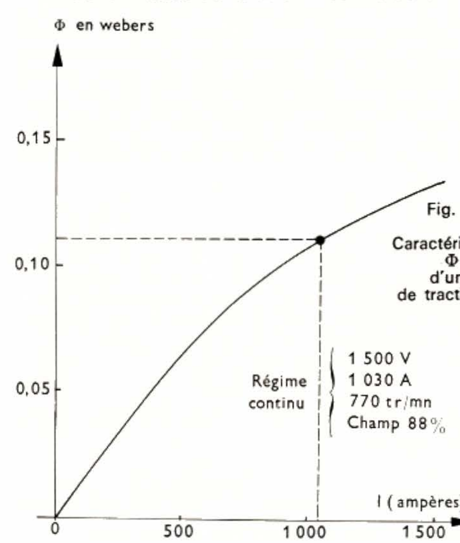


Fig. IV-108 a

Caractéristique à vide $\Phi = f(I)$ d'un moteur de traction moderne

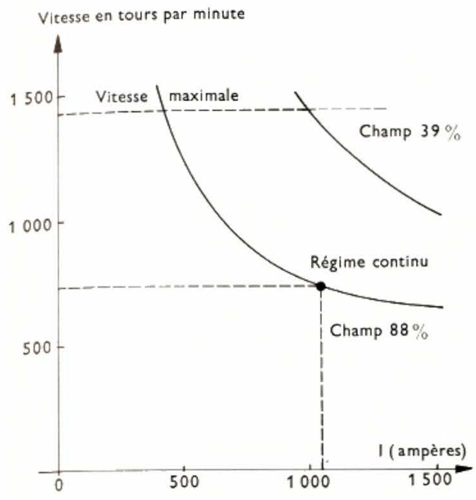


Fig. IV-108 b — Caractéristique n = f(I)

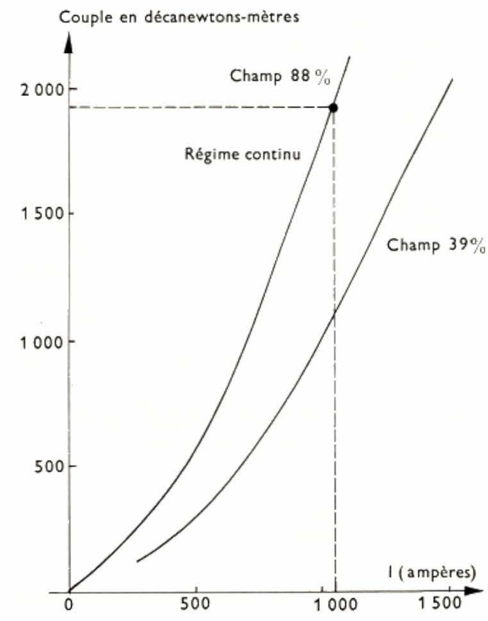


Fig. IV-108 c — Caractéristique T = f(I)

tionnent avec des vitesses périphériques allant jusqu'à 80 m/s à l'induit et 60 m/s au collecteur;

— de la densité de courant dans les enroulements, rendue possible par l'amélioration des conditions de ventilation et l'utilisation de nouveaux isolants. Les densités de courant généralement admises pour les conducteurs de l'induit sont de 7 à 8 A/mm² pour les moteurs à ventilation forcée et de 5 à 6 A/mm² pour les moteurs autoventilés.

La figure IV-108 a, b et c indique les principales caractéristiques d'un moteur moderne.

3° *Isolation.* — La publication 85 de la C.E.I., la norme NF C 51-100 classent les isolants en fonction des températures qu'ils peuvent supporter tout en conservant une durée de vie satisfaisante dans les conditions habituelles de fonctionnement.

Les limites d'échauffements admissibles pour les différentes classes d'isolation utilisées en traction sont reprises dans le tableau ci-après:

Classe d'isolation	Enroulement rotorique	Enroulement statorique
B	120 °C	130 °C
F	140 °C	155 °C
H	160 °C	180 °C

En passant de la classe *B* à la classe *H*, les épaisseurs d'isolants restant inchangées, le gain sur de puissance est d'environ 15 %. Pour les échauffements supérieurs à ceux de la classe *H*, le gain de puissance devient négligeable car la résistance du cuivre croît trop rapidement. Il est préférable de:

— réduire l'épaisseur de l'isolation,

— rechercher des isolations à coefficient de conductibilité thermique plus grand.

4° *Commutation.* — En plus des paramètres d'ordre électrique qui conditionnent la commutation de tous les moteurs, s'ajoutent, dans le cas de la traction, d'autres difficultés inhérentes aux conditions d'utilisation et notamment:

— fonctionnement, dans les deux sens de rotation, à des puissances très variables, avec de nombreux régimes transitoires;

— marche soutenue à la vitesse maximale;

— vibrations de fréquences et d'amplitudes variables;

En conséquence, une bonne commutation à tous les régimes nécessite de satisfaire les trois conditions ci-après:

— adaptation correcte des enroulements de commutation (réglage des pôles auxiliaires) et des enroulements de compensation qui se rencontrent sur la plupart des moteurs à forte puissance massique;

— choix judicieux de la qualité et de la forme des balais. L'adoption de balais divisés (deux, trois et même quatre parties) permet d'améliorer la commutation par augmentation du nombre de points de contact entre balais et collecteur et de la résistance transversale des balais aux courants de court-circuit;

— stabilité des balais. Elle implique un serrage correct et le maintien dans le temps d'une parfaite géométrie du collecteur, un bon amortissement des vibrations communiquées aux balais par les lames et les défauts du collecteur. Cet amortissement est généralement assuré par une plaquette en caoutchouc interposée entre la partie supérieure du balai et le doigt de pression.

5° *Ventilation des moteurs.* — Deux procédés différents sont employés pour assurer le refroidissement des moteurs de traction:

a) *ventilation forcée* par un ventilateur extérieur, entraîné par un moteur auxiliaire, tournant à une vitesse pratiquement constante imposée par la tension de la ligne, donc à débit d'air également constant;

b) *autoventilation* par un ventilateur interne calé sur l'arbre. — Le débit d'air varie alors avec la vitesse de rotation du moteur.

L'autoventilation qui a été longtemps réservée aux moteurs de faible puissance des automotrices est maintenant appliquée aux moteurs des locomotives (CC 6500 et BB 15000 de la S.N.C.F.). La suppression des groupes de ventilation se traduit par une notable simplification des auxiliaires, une diminution du débit d'air, par conséquent de la pollution interne du moteur, et une réduction importante du bruit.

6° *Dispositions constructives des moteurs de traction modernes :*

a) *Carcasse.* — Elle est soit massive, en acier moulé ou en tôle roulée et soudée, soit feuilletée, en tôles magnétiques. Sur la plupart des moteurs modernes la carcasse est feuilletée pour améliorer la tenue aux variations brusques de tension (V. fig. IV-109 et IV-110).

Elle comporte de chaque côté un flasque palier démontable et des portes de visite permettant l'examen du collecteur et des balais.

b) *Pôles inducteurs.* — Les pôles principaux et auxiliaires sont feuilletés. Ils sont fixés sur des portées usinées de la carcasse à l'aide de goujons vissés dans un axe prisonnier de la masse des tôles.

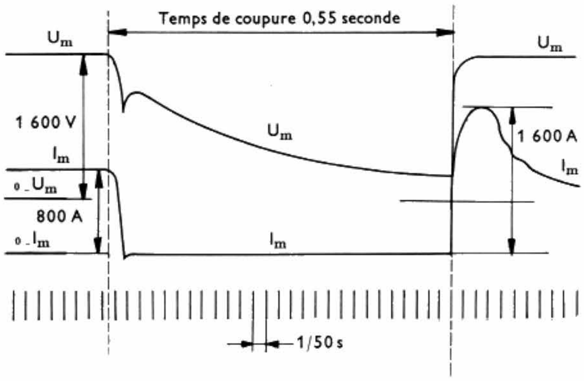


Fig. IV-109 — Coupures et rétablissements brusques de tension sur un moteur à carcasse massive 1 600 V; 800 A; champ 100 %

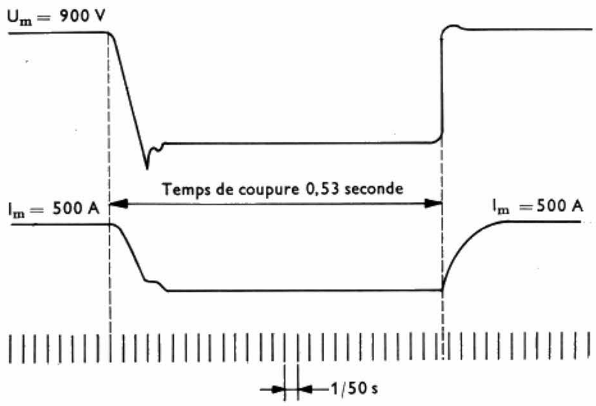
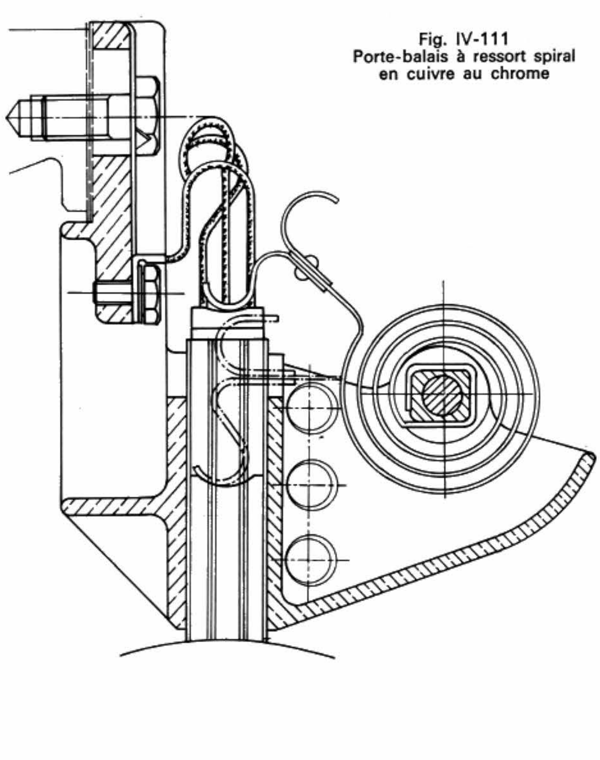


Fig. IV-110 — Coupure et rétablissement brusque de tension sur un moteur à carcasse feuilletée; champ 100 %

Sur les moteurs ne comportant pas d'enroulement de compensation les entrefers sont progressifs afin de limiter la distorsion du champ principal. Les bobines inductrices sont constituées de ruban de cuivre enroulé à plat ou sur chant avec isolement entre spires, cette dernière disposition offre une plus grande résistance aux efforts électrodynamiques qui apparaissent en cas de court-circuit. Elles sont

Fig. IV-111
Porte-balais à ressort spiral en cuivre au chrome



isolées extérieurement par enrubannage, puis imprégnées au trempé avec un vernis silicone (classe *H*), ou moulées dans une résine sans solvant (classe *F*). Dans ce cas les bobines sont ensuite collées sur la masse polaire. Les bobines d'un pôle sont quelquefois réalisées en deux éléments séparés afin d'assurer une plus grande surface de refroidissement.

c) *Porte-balais et balais.* — Les porte-balais sont généralement montés sur une couronne mobile dont la rotation permet d'amener successivement les diverses lignes de balais en face de la porte de visite la plus accessible aux agents de l'entretien. La couronne porte-balais est alimentée par des contacts élastiques à patins ou à mâchoires. Un porte-balais comprend, d'une part, des cages calibrées recevant les balais et, d'autre part, des dispositifs d'appui des balais sur le collecteur qui doivent développer un effort aussi constant que possible malgré l'usure des balais, pour exercer une pression d'environ $3 . 10^4$ Pa pour les moteurs entièrement suspendus, $4 . 10^4$ Pa pour les moteurs suspendus par le nez. Afin de limiter les dégradations en cas de flash, les porte-balais sont construits avec un matériau résistant bien à l'arc électrique comme par exemple le cuivre au chrome. Pour la même raison ils présentent des formes s'écartant rapidement du collecteur (fig. IV-111). Les balais de moteurs de traction sont exclusivement en qualités électrographitiques et présentent généralement les dispositions suivantes (fig. IV-112) :

— la poussée du système de pression s'exerce sur une pièce isolante dure et polie de façon que le doigt d'appui puisse se centrer;

— entre cette pièce et la partie supérieure du balai est disposé un amortisseur en caoutchouc silicone;

— l'amenée de courant se fait par des shunts en cuivre scellés dans le balai ou par des connecteurs amovibles.

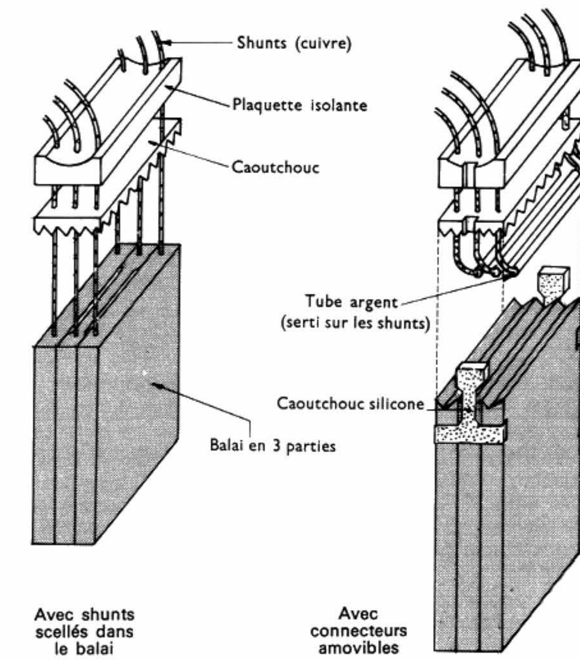
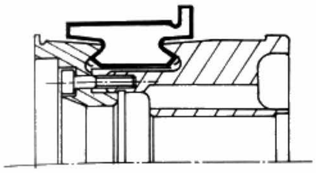


Fig. IV-112 — Balais en trois parties

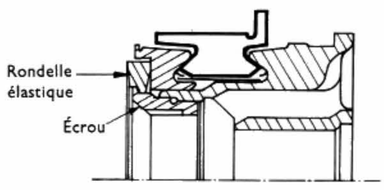
d) *Paliers d'induit.* — Ils sont équipés de roulements à rouleaux et munis de soupapes à graisse. Les boîtiers de roulement sont isolés électriquement des flasques pour éviter la destruction des rouleaux par passage de courant. Un balai de mise à la masse écoule les tensions induites dans les parties métalliques tournantes.

e) *Arbres d'induit.* — Ils sont confectionnés en acier présentant les caractéristiques mécaniques ci-après: résistance à la traction: 75 à 80 hbar, limite élastique: 60 à 75 hbar, allongement à la rupture: 21 à 18 %, résilience égale ou supérieure à 9,8 daJ/cm². Lorsque le diamètre de l'induit est important ce dernier ne comporte pas d'arbre



Collecteur à serrage par vis

Fig. IV-113



Collecteur à serrage par écrou
et rondelle élastique

massif. Dans ce cas, le tambour creux sur lequel sont clavetées les tôles est prolongé jusqu'aux flasques. Muni de tourillons, rapportés ou non, il constitue une pièce résistante assurant la transmission du couple moteur.

f) *Tôles d'induit.* — Les tôles utilisées ont une épaisseur de 0,5 mm. Elles sont empilées et clavetées soit sur le corps central du rotor, soit sur un manchon calé sur l'arbre. Les pertes dans le fer sont égales à 2,3 ou 2,6 W/kg pour les tôles des moteurs à courant continu ou ondulé et 1,45 W/kg pour celle des moteurs monophasés.

g) *Bobinage.* — L'enroulement est en général du type imbriqué parallèle simple, avec connexions équipotentielles.

Selon les moteurs, les conducteurs d'induit sont placés dans les encoches suivant l'une des trois dispositions suivantes :

— *à plat :* il en résulte une bonne utilisation de l'encoche mais la commutation n'est pas homogène, les flux coupés par les différents conducteurs n'étant pas identiques ;

— *sur chant :* la commutation est homogène mais l'encoche est moins bien utilisée ;

— *à chantournement :* le conducteur est placé à plat dans le plan supérieur et sur chant dans le plan inférieur. Cette solution est la plus rationnelle.

L'encoche est fermée par une cale en isolant stratifié, de section trapézoïdale. Pour assurer le maintien des sections en dehors du fer, le frettage de l'induit est réalisé au moyen d'un ruban de verre polyester.

h) *Collecteur.* — Il est composé de lames de cuivre à l'argent (0,87 °/₀₀ Ag), de section trapézoïdale et d'entre-lames isolantes en micanite qualité « traction » agglomérée à la gomme laque ou au glyptal, maintenues par des portées coniques. Le serrage est assuré soit par vis, soit par écrou avec interposition d'une rondelle élastique (fig. IV-113).

La liaison des conducteurs d'induit aux lames du collecteur se faisait, jusqu'en 1969, par soudage au bain d'étain pur. Actuellement, la méthode de soudage à l'arc par le procédé T.I.G. (*Tungsten inert gas*) est en voie de généralisation. Une électrode de tungstène permet, sous atmosphère neutre, de fondre avec une pénétration suffisante à la fois les extrémités du bobinage de l'induit et le cuivre des lames de collecteur. La rapidité de l'opération et la masse des éléments à souder, permet de limiter la température atteinte par les isolants à l'arrière du collecteur. Cette méthode garantit la bonne exécution et surtout l'homogénéité de toutes les soudures (V. t. 3, Soudage).

7° *Moteurs doubles.* — Dans le cas de puissances très importantes (moteur de 2950 kW des CC 6500 à bogies monomoteurs par exemple), les impératifs d'encombrement obligent à recourir à des moteurs doubles (fig. IV-114). Ils relèvent des mêmes techniques de réalisation que les moteurs simples.

5.2.3. Appareillage électrique

1° *Organes de captage de l'énergie*

a) *Pantographes.* — La ligne de contact aérienne à suspension caténaire constitue actuellement le seul mode de distribution d'énergie particulièrement bien adapté aux grandes vitesses et aux tensions élevées. Dès le début de l'électrification, le courant était capté sur le fil de contact à l'aide de perches (V. fig. IV-115) ou de trolleys ; par la suite ils furent délaissés au profit d'appareils se présentant sous la forme d'un polygone articulé appelé *pantographe*, mieux adaptés aux grandes vitesses et aux courants intenses.

Un pantographe est constitué essentiellement (V. fig. IV-116) d'un système articulé déformable ou *cadre* reposant sur un *bâti* fixé sur la toiture de l'engin moteur par l'intermédiaire *d'isolateurs* appropriés à la tension. À la partie supérieure du cadre, un *archet* à une ou deux palettes munies de barres de frottement amovibles capte le courant sur le fil de contact. Des *ressorts de travail* assurent le développement du pantographe et maintiennent, grâce à une disposition appropriée, l'effort de contact à une valeur indépendante de la hauteur de la caténaire. Un *mécanisme* mu à l'air comprimé permet de monter ou de descendre le pantographe.

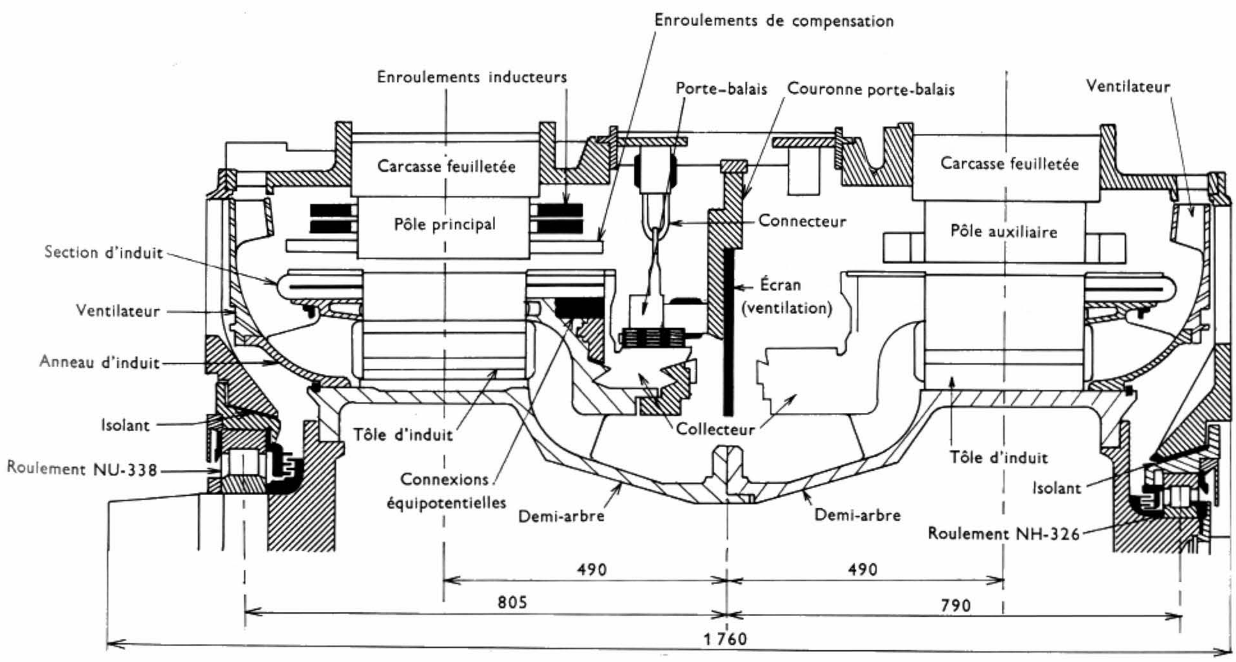


Fig. IV-114 — Moteur de traction double (type TTB 665 A1) ; demi-coupe longitudinale simplifiée

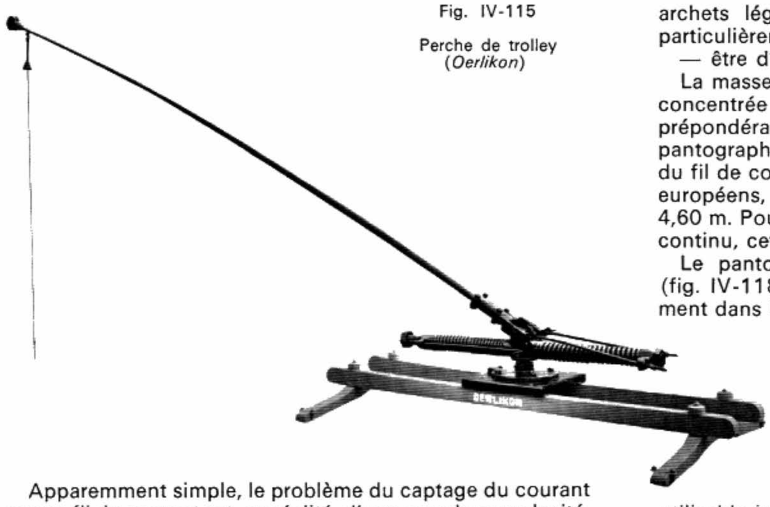


Fig. IV-115

Perche de trolley (*Oerlikon*)

Apparemment simple, le problème du captage du courant sur un fil de contact est, en réalité, d'une grande complexité. La caténaire constitue un système dont l'élasticité et la distribution de masses sont variables. Sous l'action du pantographe, le plan de contact se soulève d'une certaine quantité, oscille et entre parfois en résonance. De son côté le pantographe, fixé sur un mobile qui lui imprime des accélérations transversales et verticales, ne peut, en raison de la masse et de l'inertie de son système articulé, réagir instantanément aux variations de hauteur du fil de contact et aux mouvements de l'engin moteur. La qualité du contact est donc liée aux caractéristiques de la caténaire et du pantographe qui doivent être parfaitement adaptées les unes par rapport aux autres.

Pour assurer un bon captage, le pantographe doit :

— être un système articulé de masse aussi faible que possible afin de suivre fidèlement les variations d'altitudes du fil de contact (1,60 à 2 m) et ses déformations entre deux supports (amplitude 0,20 à 0,30 m) ;

— présenter une grande stabilité latérale ;

— exercer un effort de contact indépendant du développement et croissant avec la vitesse. La pression à l'arrêt est de 9 daN ; à 160 km/h, elle est voisine de 20 daN ;

— être équipé d'un archet dont la forme et la suspension sont appropriées à la caractéristique de la caténaire. Les archets légers à suspension indépendante conviennent particulièrement bien pour les grandes vitesses ;

— être d'une grande sécurité de fonctionnement.

La masse fictive du système articulé — masse supposée concentrée au point de contact — constitue le paramètre prépondérant. Elle est imposée par le développement du pantographe, donc par les altitudes maximale et minimale du fil de contact qui, sur l'ensemble des réseaux électrifiés européens, sont respectivement voisins de 6,20 m et 4,60 m. Pour un pantographe de forme ordinaire, à courant continu, cette masse est de 68 kg (fig. IV-117).

Le pantographe à cadre simplifié type Faiveley AM (fig. IV-118) présente une masse fictive de 50 kg seulement dans le cas d'un appareil à courant continu. Celui-ci, utilisable jusqu'à 250 km/h, équipe toutes les locomotives à très grande vitesse de la S.N.C.F. Les pantographes pour courant continu sont équipés d'archets « bipalette »

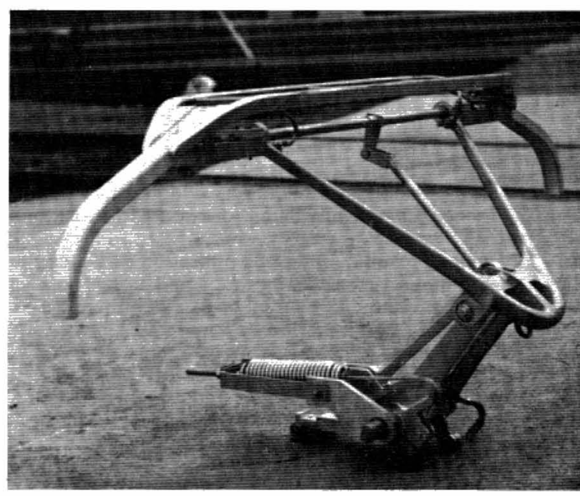


Fig. IV-117 — Pantographe à faible développement (*S.N.C.F.*)

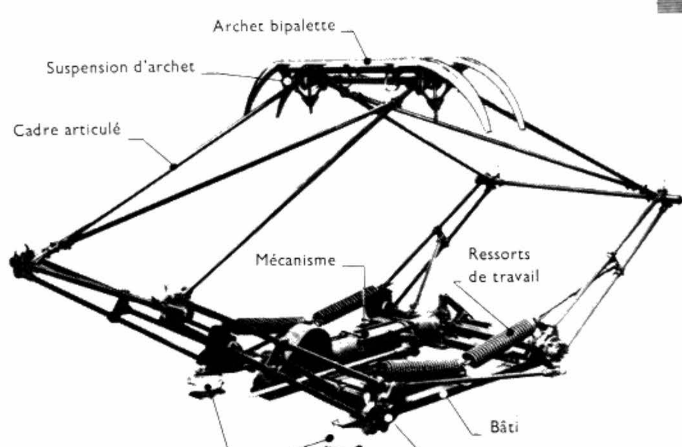


Fig. IV-116

Pantographe type G
Courant continu
1,5 kV
(*S.N.C.F.*)

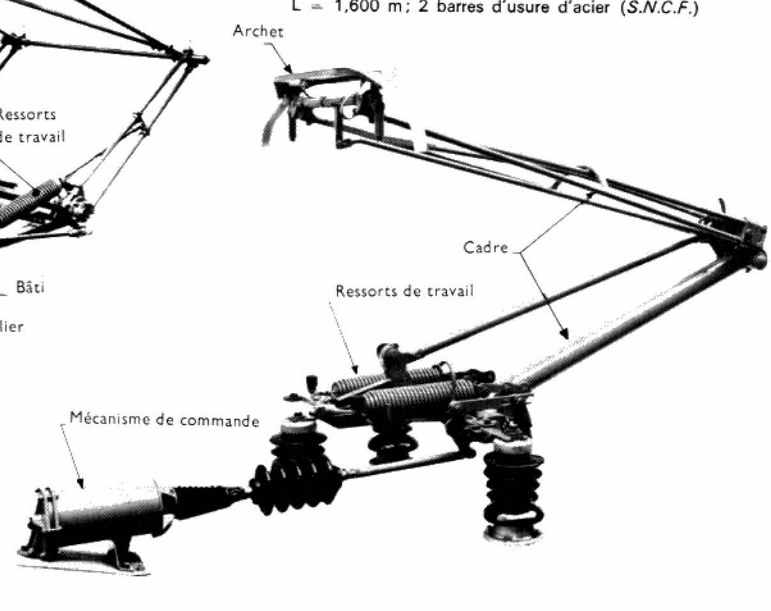


Fig. IV-118 — Pantographe AM 18 U Unipalette 25 kV ; L = 1,600 m ; 2 barres d'usure d'acier (*S.N.C.F.*)

munis au total de huit barres de frottement métalliques (deux barres en cuivre, deux barres en acier par palette). Les barres en charbon sont à déconseiller pour les courants intenses car, à l'arrêt, du fait de la résistance de contact, il peut se produire un échauffement local du fil pouvant entraîner sa rupture.

Les locomotives sont généralement équipées de deux pantographes connectés en parallèle. En marche normale il est de règle d'utiliser le pantographe arrière.

b) *Frotteurs.* — Le captage du courant par frotteurs se fait soit par le dessus du rail de distribution (cas de la ligne de Chambéry à Modane), soit par le dessous (cas de la banlieue desservie à partir de la gare Saint-Lazare à Paris). Le frotteur (fig. IV-119) est constitué d'un ou deux leviers dont une extrémité est articulée sur une platine portant deux barres de frottement amovibles en acier dur. Un plongeur à ressort fixé sur la platine exerce son action sur chaque levier, à une certaine distance du point d'articulation, de façon à réaliser un effort de contact proche de 9 daN.

L'admission d'air comprimé dans le plongeur permet d'augmenter l'effort pour améliorer le contact en période de givrage. Le frotteur est fixé sur une partie non suspendue du bogie, et à proximité d'une boîte d'essieu pour limiter les déplacements, tant dans le plan vertical que dans le plan horizontal, par rapport au troisième rail. Les frotteurs supportent de ce fait des accélérations très importantes et sont exposés aux intempéries et aux projections de ballast; leur fiabilité est médiocre et les frais d'entretien élevés. En outre, leur utilisation est limitée à des vitesses voisines de 120 km/h. Par ailleurs, pour capter le courant sans interruption dans les zones de discontinuité du troisième rail (passages à niveau et aiguillages), chaque engin moteur

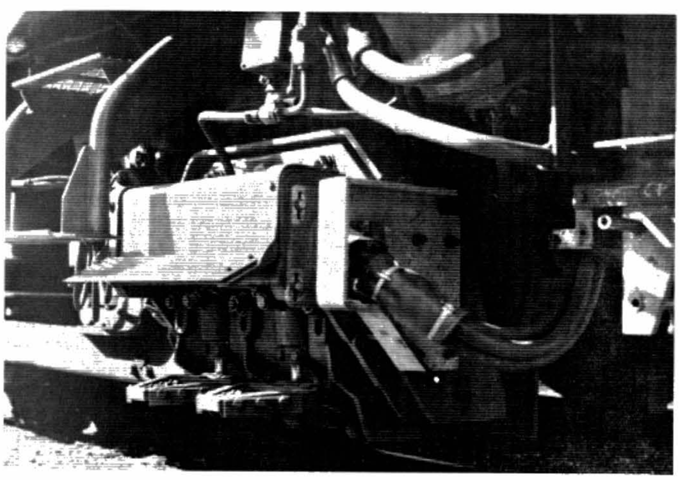


Fig. IV-119

Frotteur de prise de courant par 3e rail sur CC 6500 (*S.N.C.F.*)

doit être muni de deux frotteurs, à ses deux extrémités un à droite et un à gauche. Ces organes engageant le gabarit international de circulation, doivent être relevables afin que les engins moteurs ainsi équipés puissent circuler sur les lignes sans troisième rail. Lorsque les engins sont également équipés de pantographes il est recommandé de prévoir un dispositif de sécurité interdisant la mise sous tension simultanée des frotteurs et des pantographes.

2° *Appareils de protection.* — La protection générale contre les surintensités dans les circuits haute tension de la locomotive est assurée par un disjoncteur, qui s'ouvre soit lorsqu'il est traversé par un courant trop intense, soit lorsqu'un relais commande son intervention. Par ailleurs des coupe-circuits sont utilisés dans les circuits auxiliaires, à haute ou basse tension, et dans les circuits de commande. (V. t. 2, Transport et distribution de l'énergie électrique, chap. 6).

a) *Disjoncteur à courant continu.* — Cet appareil est constitué essentiellement (fig. IV-120) par les organes du circuit principal, le mécanisme de commande et le dispositif détecteur de surcharge.

Le circuit principal comprend : les contacts fixe et mobile, ce dernier relié au mécanisme par une bielle isolante, et le dispositif de coupure de l'arc. Une bobine, insérée dans le

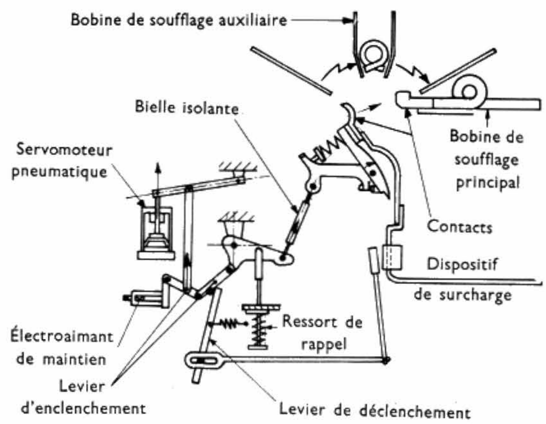


Fig. IV-120 — Disjoncteur à courant continu

circuit principal, exerce une première action de soufflage de l'arc. En se développant, l'arc atteint et alimente une bobine auxiliaire, dont l'action s'ajoute à la précédente. Le développement de l'arc et sa coupure ont ensuite lieu dans une cheminée en matériau réfractaire.

Le mécanisme comprend un servomoteur pneumatique, un électroaimant et une serrure. L'électroaimant de maintien étant alimenté, les leviers d'enclenchement, dont l'un porte un galet, s'arc-boutent sous l'action du servomoteur. Ils sont verrouillés dans cette position par le levier de déclenchement qui s'engage sous le galet. L'équilibre de la serrure est détruit et le disjoncteur s'ouvre si un relais



Fig. IV-121

Schéma de principe des différents types de relais

coupe le circuit de l'électroaimant ou si le dispositif détecteur de surcharge fait basculer le levier de déclenchement.

Le dispositif détecteur de surcharge est formé d'un circuit magnétique entourant le conducteur de sortie du courant. Si l'intensité du courant atteint le seuil de réglage, l'armature est attirée et, par l'intermédiaire d'une biellette, elle entraîne le levier de déclenchement.

b) *Relais de protection* (fig. IV-121). — Les relais contrôlant des grandeurs électriques comportent un circuit

magnétique dont l'armature est rappelée par ressort; les contacts mobiles peuvent être directement solidaires de cette armature.

En fonction du circuit électrique utilisé pour produire le flux, les relais peuvent être classés comme suit:

— *Relais de tension :* ils possèdent une bobine à grand nombre de spires, donc d'une très grande impédance, qui engendre un flux proportionnel à la tension contrôlée (exemple d'application: contrôle de la tension de caténaire).

— *Relais d'intensité :* leur circuit magnétique entoure une barre parcourue par le courant à contrôler, ou simplement une dérivation parcourue par une fraction de courant, de sorte que le flux est proportionnel à l'intensité du courant (exemple d'application: contrôle de l'intensité du courant dans les moteurs).

— *Relais différentiels d'intensité :* ils comportent deux barres parcourues en sens inverse par les courants à comparer; le flux est alors proportionnel à la différence des intensités des courants (exemple d'application: relais de détection des masses comparant les courants d'entrée et de sortie du circuit de traction).

— *Relais composites :* ils possèdent à la fois une bobine de contrôle de la tension U et une barre de contrôle du courant I, de sorte que le flux Φ est une combinaison de ces deux grandeurs: $\Phi = aU + bI$ (exemple d'application: relais dit « d'accélération », qui pilote un équipement automatique en tenant compte de l'intensité du courant dans les moteurs et de la tension à leurs bornes).

Des relais spéciaux peuvent contrôler des grandeurs autres qu'électriques, par exemple une température. Pour ce genre de contrôle, l'organe de mesure consiste en une sonde à thermistance (à coefficient de température positif) insérée dans le circuit d'un relais électronique.

c) *Coupe-circuit.* — Les coupe-circuit à fusible, qui utilisent des alliages à fusion très rapide, sont conçus de façon à ne provoquer que de faibles surtensions malgré l'auto-induction des circuits dans lesquels ils sont utilisés. Ils assurent essentiellement la protection des moteurs auxiliaires alimentés à partir de la caténaire.

Les circuits à basse tension, alimentés par la batterie d'accumulateurs, sont protégés au moyen de microdisjoncteurs ou coupe-circuit magnétothermiques dont le déclenchement est provoqué, soit par attraction d'une armature, soit par déformation d'une bilame, de sorte qu'ils réagissent bien aux surintensités instantanées de grande valeur et aux surcharges prolongées de valeur modérée.

3° *Rhéostats de démarrage.* — Les rhéostats sont réalisés suivant deux conceptions fondamentales:

— *Les rhéostats lourds* sont composés de grilles de fonte empilées. En raison de leur grande masse et de leur surface de refroidissement relativement faible ils emmagasinent une grande part de l'énergie calorifique qui se dissipe ensuite, lorsque le démarrage est terminé. La puissance massique de ces rhéostats est voisine de 0,3 kW/kg et leur constante de temps est proche de 450 s. Ils sont utilisés avec ventilation naturelle ou avec une ventilation forcée modérée.

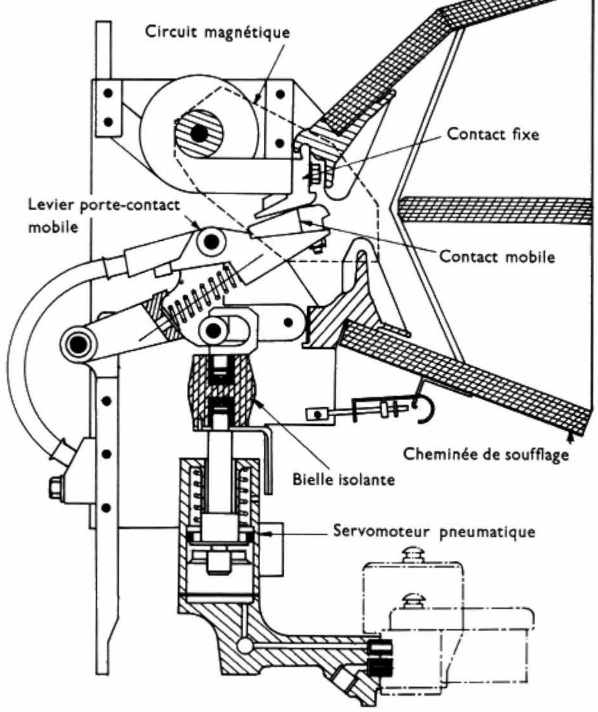
— *Les rhéostats légers* sont constitués de bandes de métal résistant pliées en accordéon. En raison de leur faible masse et de leur surface de refroidissement importante, ils ont une constante de temps réduite, 100 s environ, et une puissance massique voisine de 1 kW/kg. Ils sont de plus en plus employés sur les locomotives. Leur faible capacité calorifique impose de les ventiler énergiquement. Les moteurs des ventilateurs sont connectés en parallèle sur la portion de rhéostat éliminée en dernier; ainsi leur mise en route et leur arrêt se font sans l'intervention de contacteurs auxiliaires. De plus leur vitesse étant proportionnelle au courant dans le rhéostat, leur débit varie en fonction de la quantité de chaleur à évacuer.

4° *Appareils de commutation du circuit de puissance.* — Les appareils de commutation des circuits de puissance se répartissent en trois groupes:

— les contacteurs de ligne, de couplage, de shuntage, etc.;

— les contacteurs ou le graduateur de rhéostat;

Fig. IV-122 — Contacteur électropneumatique



— les inverseurs de marche, commutateurs traction-freinage, etc.

a) *Contacteurs de ligne, de couplage, de shuntage, etc.* — Les contacteurs individuels sont du type électropneumatique (fig. IV-122). Une électrovalve alimente un servomoteur pneumatique qui, par l'intermédiaire d'une bielle isolante, actionne le porte-contact. Ce dernier, constitué de deux leviers articulés, est maintenu en extension par un ressort. À la fermeture du contacteur cet ensemble se déforme et le ressort assure une pression de contact indépendante de la pression d'air. À l'ouverture, l'arc se développe dans une cheminée sous l'action magnétique d'une bobine de soufflage.

b) *Contacteurs de rhéostat.* — L'élimination du rhéostat est obtenue en court-circuitant successivement les portions de résistance au moyen d'une des trois dispositions ci-après:

— Des *contacteurs individuels*, identiques à ceux utilisés pour les couplages, sont commandés successivement selon une séquence fixée par un programmeur à tambour avec la disposition représentée sur la figure IV-123 a; l'élimination d'une portion de rhéostat se fait en deux temps: court-circuit, puis mise hors circuit de la portion intéressée. Cette disposition est intéressante pour deux raisons: d'une part, un seul contacteur reste traversé par le courant de traction à l'achèvement du démarrage et, d'autre part, le shuntage de l'induit par résistances (pour enrayer les patinages) peut être obtenu très simplement par fermeture d'un seul contacteur supplémentaire *P*. La disposition représentée sur la figure IV-123 b n'offre pas ces avantages, mais en contrepartie elle permet des combinaisons de résistances et le nombre de contacteurs peut être réduit.

— Des *contacteurs à cames*, disposés côte à côte, reçoivent leur mouvement d'un arbre à cames (fig. IV-124) qui, dans ce cas, joue le rôle de programmeur.

— Un *graduateur* comportant deux contacteurs commutés sur les portions successives du rhéostat par un sélecteur à plots et contacts roulants travaillant à vide et baignant dans l'huile. La figure IV-125 montre la séquence de fonctionnement.

c) *Commutateurs et inverseurs.* — De par leur fonction les commutateurs sont conçus pour n'être manœuvrés qu'à vide et relèvent de deux conceptions différentes (fig. IV-126).

— *Les commutateurs à contacts glissants* constitués d'un tambour tournant équipé de segments sur lesquels portent les contacts fixes.

— *Les commutateurs à contacts roulants* immergés dans l'huile dans lesquels un chariot équipé de deux rouleaux se déplace sur les deux rails constitués par les plots à commuter. Cette disposition est préférable à la précédente car l'effet des forces électrodynamiques augmente la pression de contact en cas de surintensité accidentelle résultant, par exemple, d'un flash de moteur.

5° *Circuits de commande.* — Les appareils à haute tension du circuit de puissance et des circuits auxiliaires sont commandés électriquement depuis les pupitres de conduite par des circuits à basse tension alimentés par une batterie d'accumulateurs. Les contacteurs à commande individuelle sont commandés soit directement à partir de manipulateurs (ce qui impose un grand nombre de fils de liaison), soit par l'intermédiaire d'un servomoteur ne nécessitant que quelques conducteurs et qui peut être aisément placé sous la dépendance d'automatismes intervenant occasionnellement ou en permanence.

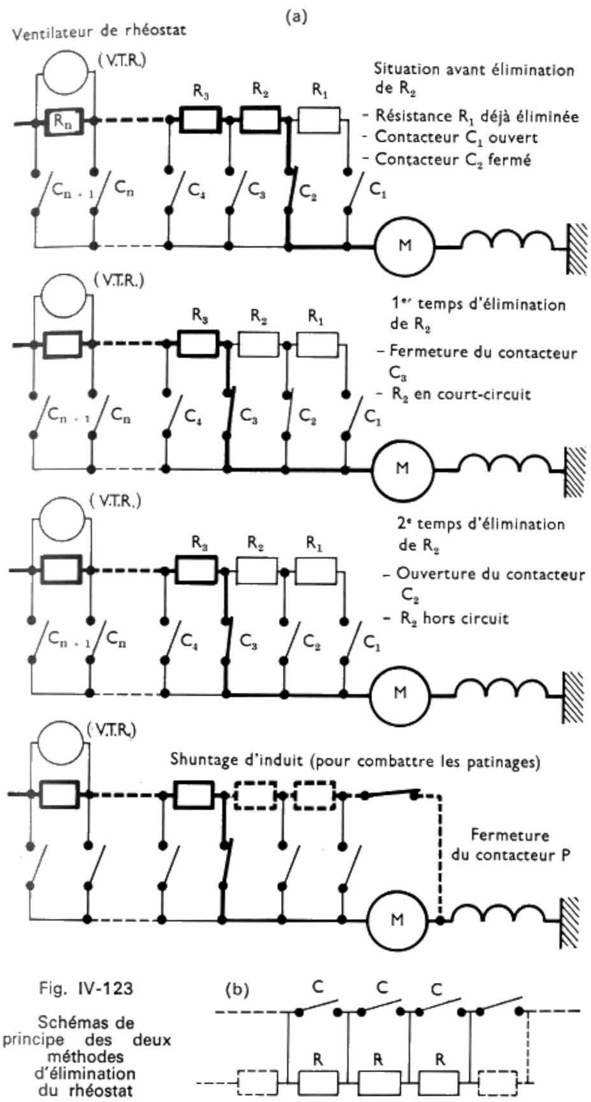


Fig. IV-123

Schémas de principe des deux méthodes d'élimination du rhéostat

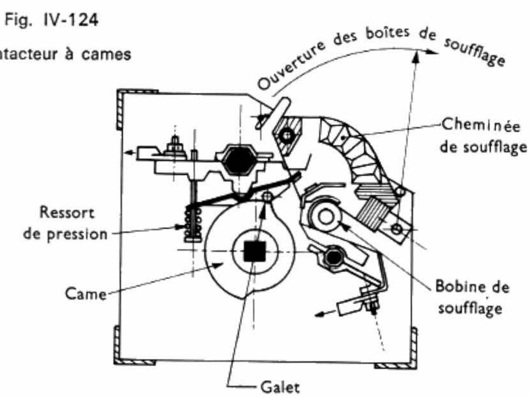


Fig. IV-124

Contacteur à cames

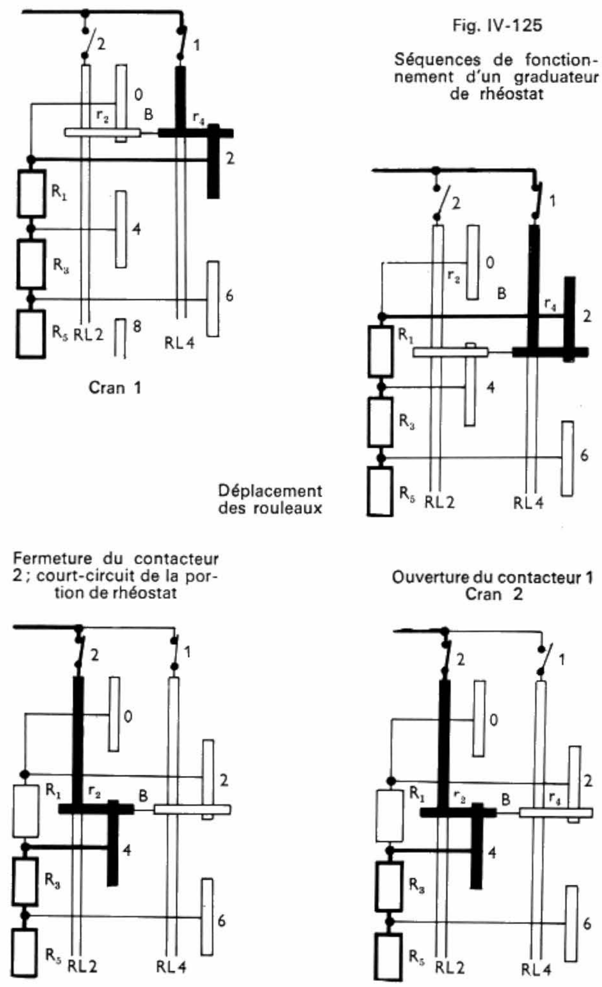


Fig. IV-125

Séquences de fonctionnement d'un graduateur de rhéostat

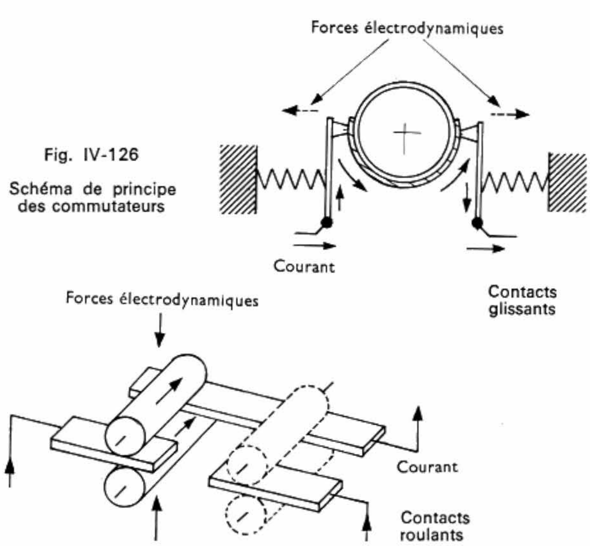


Fig. IV-126

Schéma de principe des commutateurs

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES LOCOMOTIVES A COURANT CONTINU 1,5 kV												
	MOYENNE PUISSANCE					GRANDE PUISSANCE						
Série	BB-9400			BB-8500		BB-9201 à 9290	BB-9301 à 9340	BB-9291 et 9292	CC-6500			
Date de mise en service	1959			1964		1957	1967	1963	1968/1970			
Nombres d'engins existants ou prévus	135			87		131		2	59			
Diagramme	14 400			14 700		16 200			20 190			
	9 401 à 9 530	9 531 à 9 535	bi-rapport	Régime	Régime	(sauf BB-9278 BB-9281, BB-9282, BB-9288)	BB-9278 BB-9281 BB-9282 BB-9288		Rapport P.V.		Rapport G.V.	
	rapport 1,99	rapport 1,93	rapport 1,45	« voyageurs »	« marchandises »				Champ maxi.	Champ mini.	Champ maxi.	Champ mini.
Régime continu: Puissance (kilowatts)	2 210	2 210		2 940		3 850	3 850	4 240	5 520	5 900	5 520	5 900
Régime continu: Vitesse (kilomètres par heure)	61	63	84	79	47	93	106	150	68	97,5	149	213
Régime continu: Effort (decanewtons)	12 400	12 200	9 000	13 050	21 900	14 500	12 750	9 900	28 500	21 400	13 050	9 800
Vitesse maximale (kilomètres par heure)	120	120	180	150	90	160	200	250	100		220	
Effort à vitesse maximale (décanewtons)	6 370	5 800	3 430	6 800	11 400	8 330	5 880	5 700	20 300		9 200	
Masse totale (tonnes)	59	61		78		82	82	80	115			
Type de bogie	Monomoteur			Monomoteur		Bimoteur		Bimoteur	Monomoteur			
Nombre de rapports d'engrenages	1	2		2		1		1	2			
Type de redresseur	—	—		—		—		—	—			

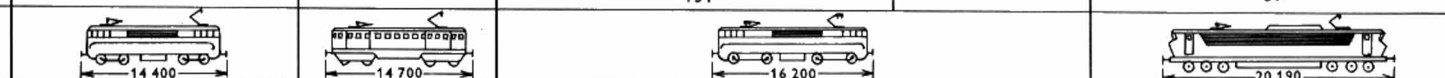


Schéma simplifié du circuit de traction

Schéma simplifié du circuit de freinage électrique

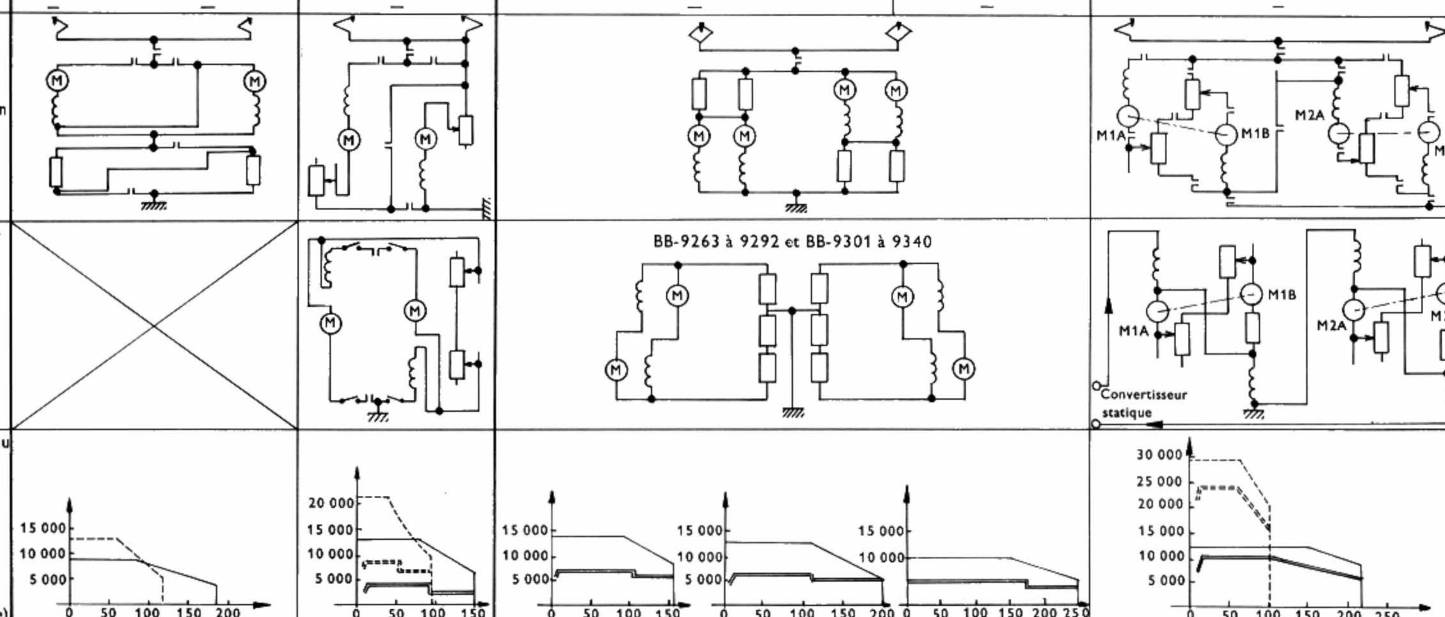
Courbe effort-vitesse au régime continu

En traction { ---- rapport P.V. / —— rapport G.V.

En freinage { ▪▪▪▪ rapport P.V. / ▬▬ rapport G.V.

F (décanewtons)

V (kilomètres par heure)



Pantographe de prise de courant sur la caténaire

Fig. IV-127

Les équipements à arbre à cames ou à graduateurs sont également actionnés par servomoteur. Avec ces équipements il est possible de prévoir une commande manuelle de secours pour remédier à certaines défaillances des circuits de commande.

En réunissant par des câblots multiconducteurs les circuits de commande de plusieurs engins moteurs, ceux-ci peuvent être commandés en synchronisme à partir de l'engin de tête; ils constituent ainsi une « unité-multiple ». Les ordres peuvent aussi être transmis par radio ou par courants porteurs à haute fréquence en utilisant comme conducteur la caténaire (ou le rail d'alimentation).

La commande de l'équipement peut être confiée à un régulateur de vitesse qui amène et maintient automatiquement le convoi à la vitesse choisie par le conducteur, lequel dispose alors d'une commande par affichage. La marche peut également être programmée par un équipement électronique approprié. Ces dispositions particulièrement intéressantes sur les engins à grande vitesse, permettent au conducteur de consacrer toute son attention à l'observation des signaux.

6° *Services auxiliaires.* — Les services auxiliaires sont assurés par les organes suivants :

a) *Groupes moteurs-compresseurs.* — Ces groupes fournissent l'air comprimé utilisé pour le freinage pneumatique et le fonctionnement de l'appareillage électropneumatique. Chaque groupe comprend un moteur série (1,5 kV) entraînant, par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse, un compresseur d'air mono- ou bi-étage. Le matériel ancien comporte deux groupes moteurs-compresseurs débitant chacun 1 550 l/mn sous 8 bars alors que les engins récents ne possèdent qu'un seul groupe débitant 2 200 l/mn sous 8 bars.

b) *Groupes moteurs-ventilateurs.* — Ces groupes sont utilisés :

— pour la ventilation des moteurs de traction. Sur le matériel alimenté sous 1 500 V l'entraînement se fait généralement avec des moteurs 750 V couplés par deux en série ;

— pour la ventilation du rhéostat de démarrage de la locomotive, le moteur, à basse tension, est connecté sur une portion du rhéostat.

c) *Système de charge de la batterie.* — La charge est assurée par l'un des moyens suivants :

— à partir de la caténaire par l'intermédiaire de résistances (peu utilisé) ;

— par le courant des groupes moteur-compresseur et moteurs-ventilateurs (la batterie est insérée dans leurs circuits du côté masse ;

— par un groupe tournant (continu-continu ou continu-alternatif avec redresseurs) ou par un convertisseur statique, qui peut assurer aussi d'autres fonctions telles que, par exemple, l'excitation des moteurs de traction pour le freinage électrique (V. fig. IV-105).

5.3. Locomotives modernes à courant continu. — La figure IV-127 (page précédente) reprend à titre d'exemple les caractéristiques essentielles de locomotives à courant continu de la S.N.C.F.

5.3.1. Locomotives de moyenne puissance. — Elles sont représentées par les BB 9400-9500 et les BB 8500; les unes et les autres à bogies monomoteurs.

— BB 9400-9500 : elles se signalent par leur légèreté et leur simplicité. Cinq locomotives de la série possèdent des pignons coulissants permettant de changer le rapport d'engrenages à l'arrêt. Deux couplages des moteurs sont utilisés : série et parallèle, avec possibilité de démarrer directement en couplage parallèle. Le rhéostat est éliminé par graduateur, le shuntage et les couplages des moteurs sont réalisés à l'aide de contacteurs à commande individuelle.

— BB 8500 : elles représentent la version « continu » des locomotives bicourant BB 25500. Un système à basculeur, manœuvrable à l'arrêt, permet de changer le rapport d'engrenages. Des contacteurs à commande individuelle sont utilisés pour le shuntage et, étant sous la dépendance d'un servomoteur, pour les couplages (série et parallèle) ainsi que pour l'élimination du rhéostat. Le freinage rhéostatique est réalisé avec auto-excitation des moteurs.

5.3.2. Locomotives de grande puissance. — Elles sont représentées par les BB 9200-9300 et les CC 6500 :

— BB 9200-9300 : elles comportent des bogies bi-moteurs ; par adoption d'un rapport d'engrenages différent, la vitesse maximale a été portée, pour quelques-unes, de 160 à 200 km/h et même à 250 km/h pour les BB 9291 et 9292. La puissance de ces dernières a été augmentée par adoption d'une nouvelle isolation. L'élimination du rhéostat, le couplage et le shuntage des moteurs sont assurés par des contacteurs à came. Les BB 9300 et une partie des BB 9200 sont dotées du freinage rhéostatique avec auto-excitation des moteurs.

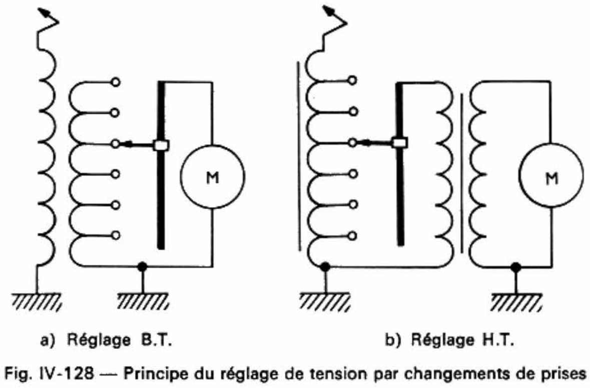
— Les CC 6500, version « continu » des locomotives bi-courants CC 21000, comportent des bogies monomoteurs avec dispositifs de changement du rapport d'engrenages par basculeur manœuvrable à l'arrêt. Les moteurs sont du type « tandem » c'est-à-dire constitués de deux moteurs élémentaires où tous les inducteurs sont logés dans une même carcasse et les deux induits sur un arbre unique. Les moteurs élémentaires sont usuellement couplés en série-parallèle et parallèle ; le couplage en série est réservé aux cas où les installations d'alimentation exigent une limitation de courant. Deux graduateurs (un par moteur double), commandés par un servomoteur unique, assurent l'élimination du rhéostat ; le shuntage et les couplages des moteurs s'opèrent au moyen de contacteurs à commande individuelle.

Par leur puissance de 5 900 kW et leur double rapport d'engrenages (ce qui leur permet d'atteindre 100 ou 220 km/h) les CC 6500 sont utilisables pour remorquer aussi bien des trains de marchandises lourds sur des lignes à profil accidenté que des trains de voyageurs à très grande vitesse. Leur équipement de freinage répond aux exigences de la très grande vitesse. Le freinage rhéostatique, à mise en action immédiate, utilise l'excitation séparée des moteurs assurée par un convertisseur statique pour les freinages normaux et par une batterie d'accumulateurs pour les freinages d'urgence. Cette dernière disposition confère un freinage de sécurité utilisable même en l'absence de tension à la caténaire.

5.4. Partie électrique des locomotives à courant monophasé. — La tension de la caténaire (15 kV-16$\frac{2}{3}$ Hz ou 25 kV-50 Hz) est abaissée par un transformateur qui assure l'isolement entre ligne et circuits de traction. La tension de sortie est soit utilisée directement par les moteurs de traction, soit préalablement convertie par un groupe tournant ou un convertisseur statique en une tension continue ou en un système triphasé de tensions alternatives. Selon le procédé utilisé le réglage de tension (et donc de la vitesse) s'effectue sur le transformateur ou sur le convertisseur. Avec certaines des solutions, le réglage de l'excitation des moteurs de traction est aussi utilisé.

5.4.1. Équipement électrique et réglage de la vitesse

1° *Locomotives à moteurs monophasés à collecteur.* La tension est réglée par changement de prises sur le transformateur suivant l'une des dispositions ci-après (fig. IV-128 a, b et c).



a) Réglage B.T. b) Réglage H.T.

Fig. IV-128 — Principe du réglage de tension par changements de prises

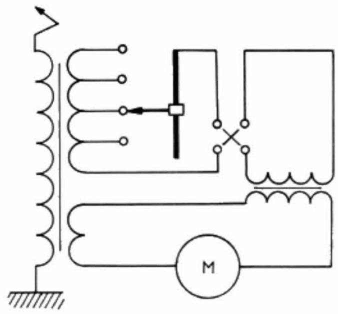


Fig. IV-128 c

Réglage sur tension intermédiaire par survolteur-dévolteur

— *réglage sur la basse tension:* plutôt réservée aux engins de puissances modérées (automotrices en particulier) afin que les courants soient eux-mêmes modérés;

— *réglage sur la haute tension:* qui exige un autotransformateur de réglage suivi d'un transformateur abaisseur; la masse du groupe transformateur s'en trouve accrue (V. tableau § 5.4.4, 3° d). Cette solution convient aux puissances importantes;

— *réglage sur une tension intermédiaire* au moyen d'un montage survolteur-dévolteur avec enroulement de réglage et inverseur; c'est une disposition assez peu employée.

Les changements de prises peuvent être réalisés avec des contacteurs ou avec un graduateur. Les premiers ne s'utilisent que sur la basse tension ou sur une tension intermédiaire. En revanche, le graduateur, avec sélecteur à plots et contacts mobiles immergés dans l'huile, s'utilise aussi bien sur la haute tension que sur la basse tension.

Dans tous les cas le passage d'une prise à l'autre s'opère sans interruption de courant et sans court-circuit de bobines du transformateur, en insérant, entre les prises intéressées, une inductance ou une résistance (V. § 5.4.4, 5°).

Avec les moteurs monophasés à collecteur le réglage d'excitation ne peut pas être utilisé pour des questions de commutation propres à ces moteurs (V. § 5.4.3, 1°). Néanmoins tous les crans de marche sont économiques.

2° *Locomotives à conversion courant monophasé-courant continu par groupe tournant.* — Le groupe convertisseur est constitué par un moteur à courant alternatif, synchrone ou asynchrone, entraînant une génératrice à courant continu à excitation séparée. Celle-ci alimente les moteurs de traction. Le moteur du groupe est alimenté par le secondaire d'un transformateur à rapport fixe dont le primaire est relié à la ligne. Le réglage de l'excitation de la génératrice permet de faire varier la tension d'alimentation des moteurs de traction, et d'obtenir ainsi toute une famille de caractéristiques effort-vitesse, tous les crans de marche étant économiques. Afin de réduire le dimensionnement de la génératrice, une réduction modérée du champ des moteurs de traction est également utilisée pour le réglage de la vitesse.

Sur les locomotives CC 14100 de la S.N.C.F., deux génératrices principales, calées sur l'arbre d'un moteur synchrone, alimentent chacune trois moteurs de traction branchés en parallèle (fig. IV-129). La tension des génératrices est réglée par l'excitation de leur excitatrice. Ces locomotives présentent les particularités suivantes:

— la puissance absorbée par la génératrice est limitée (excitation composée) pour éviter toute surcharge et tout décrochage du moteur synchrone;

— la réduction de l'excitation des moteurs de traction est progressive et automatique: aux ampères-tours de l'excitation en série du moteur s'ajoutent des ampères-tours de l'excitation séparée qui sont réduits à mesure que la tension augmente.

Pour cette conversion de courant alternatif en courant continu les groupes tournants ont été supplantés par les redresseurs (V. § 5.4.1, 4°).

3° *Locomotives à conversion de courant monophasé-triphasé par groupe tournant.* — Le courant monophasé est transformé en un système triphasé de courants dans un convertisseur de phase afin de pouvoir utiliser des moteurs de traction à induction. Deux méthodes sont applicables pour régler la vitesse de ces moteurs:

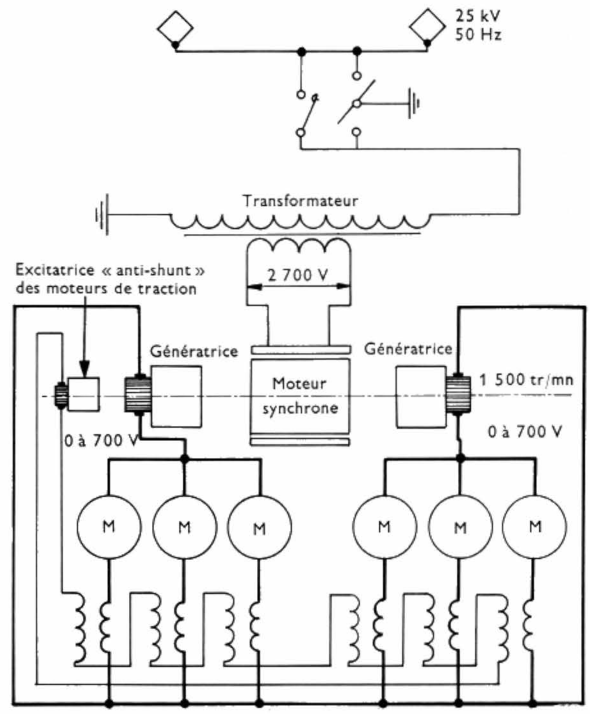


Fig. IV-129 — Locomotives à groupe tournant monophasé-continu (CC 14100) ; schéma de puissance en traction

— modification du nombre de pôles de ces moteurs asynchrones de traction;

— modification de la fréquence au moyen d'un convertisseur de fréquence. Cette variation de fréquence est obtenue en réglant la vitesse du rotor du convertisseur par rapport à celle du champ tournant, soit de façon discontinue en agissant sur le nombre de pôles, soit de façon continue si le rotor est accouplé à un moteur à vitesse réglable (fig. IV-130). Certes, l'emploi de moteurs de traction sans collecteur est intéressant mais le recours à des

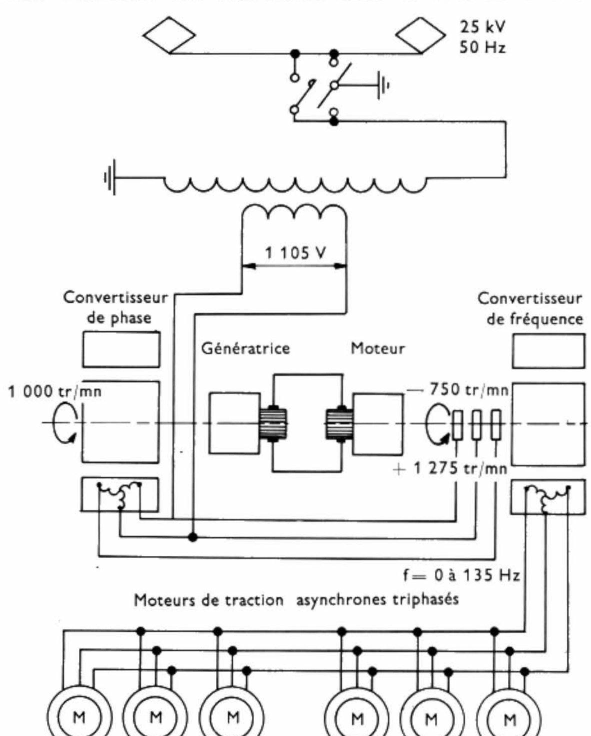


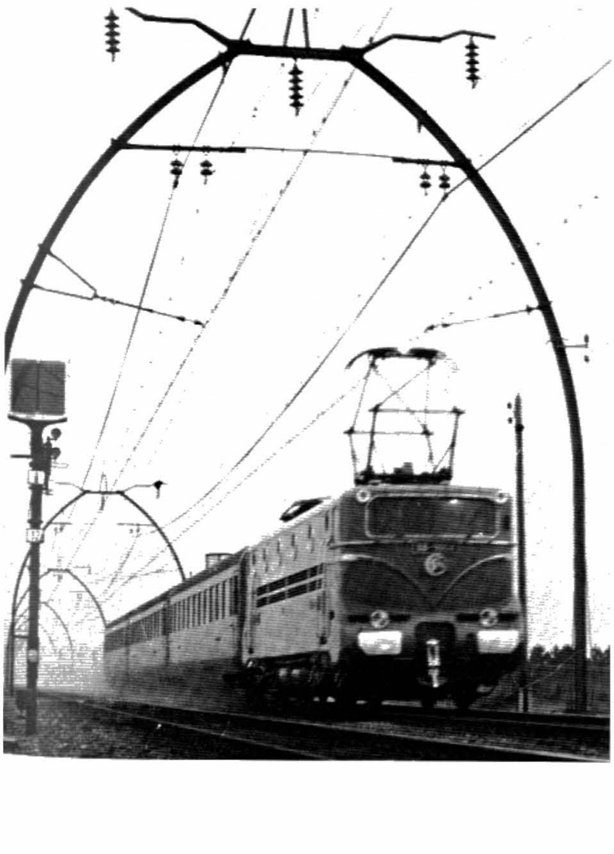
Fig. IV-130 — Locomotives à groupe tournant monophasé-triphasé; schéma de puissance en traction (CC 14000)

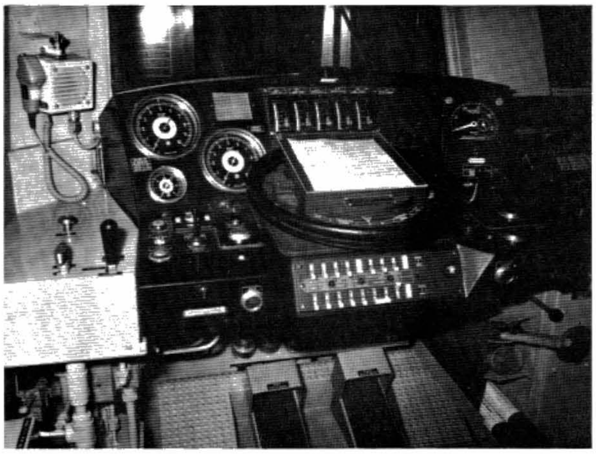


Locomotive BB type 8100
Caisse à revêtement travaillant et bogies attelés; courant continu 1,5 kV (*S.N.C.F.*)



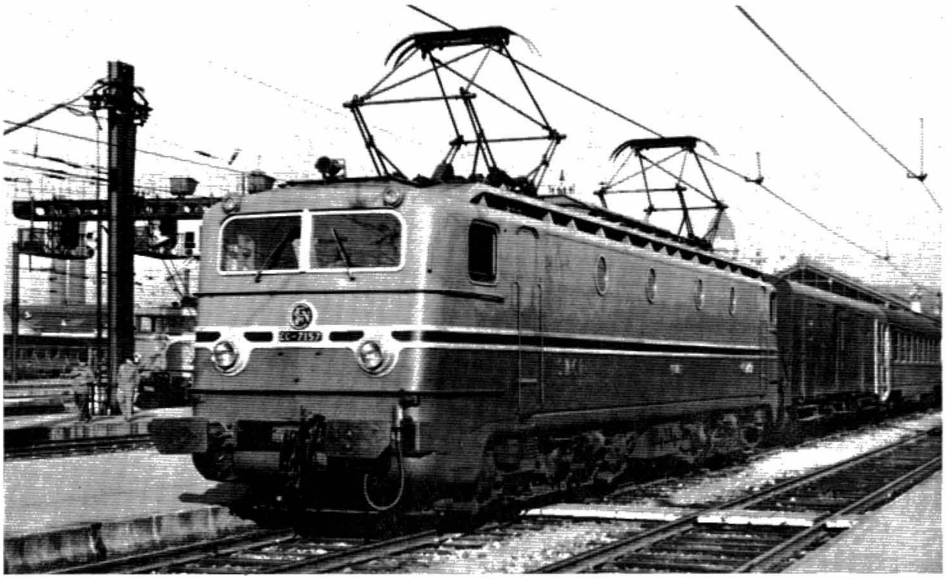
Locomotive 2D2 série 9100 à boîtes d'essieu intérieures et transmission Büchli à secteurs dentés et biellettes (courant continu 1,5 kV) (*S.N.C.F.*)





Pupitre de conduite fonctionnel pour conduite en position normale assise; il équipe les locomotives CC 6500 et 21000 (*S.N.C.F.*)

Locomotive BB type 9004
(cette locomotive détient avec la CC 7107, le record du monde de vitesse sur rails, depuis mars 1955: 331 km/h) (*S.N.C.F.*)



Locomotive CC type 7100 à transmission Alsthom à anneau dansant et biellettes (courant continu 1,5 kV) (*S.N.C.F.*)



Locomotive BB type 9300 à bogies bi-moteurs, mono-rapport à transmission à cardans (courant continu 1,5 kV) (*S.N.C.F.*)



Locomotive CC type 6500 de grande puissance, à bogies monomoteurs bi-rapports (*S.N.C.F.*)

machines tournantes lourdes et encombrantes pour la conversion de phase et de fréquence condamne pratiquement cette solution. Cependant, cela ne signifie pas le rejet définitif de la conversion monophasé-triphasé, car les convertisseurs statiques (onduleurs) sont susceptibles de lui conférer, dans l'avenir, un regain d'intérêt (V. t. 1, Électronique, chap. 19).

4° *Locomotives à conversion de courant par redresseurs.*

a) *Généralités sur les redresseurs utilisés.* — Les redresseurs à vapeur de mercure utilisés à l'origine et encore en service ont été supplantés, pour la construction du matériel récent, par les redresseurs à semiconducteurs dont les premières applications en traction remontent à 1958.

— *Redresseurs à vapeur de mercure :* Des redresseurs polyanodiques à vide entretenu, refroidis par eau, puis polyanodiques scellés refroidis par air, ont été employés sur les premiers engins à redresseurs. Mais le développement des locomotives de ce type s'est fait avec des tubes mono-anodiques, parfois bi-anodiques, scellés et refroidis par air ou par eau. La régulation thermique par eau, très utilisée, convient bien pour maintenir les tubes dans une gamme étroite de température (voisine de 35 à 45 °C) favorable à leur bon fonctionnement. Deux types de redresseurs sont utilisés : l'ignitron (fig. IV-131) dans lequel la tache cathodique est recréée à chaque alternance active, et l'excitron (fig. IV-132) dans lequel elle est entretenue en permanence.

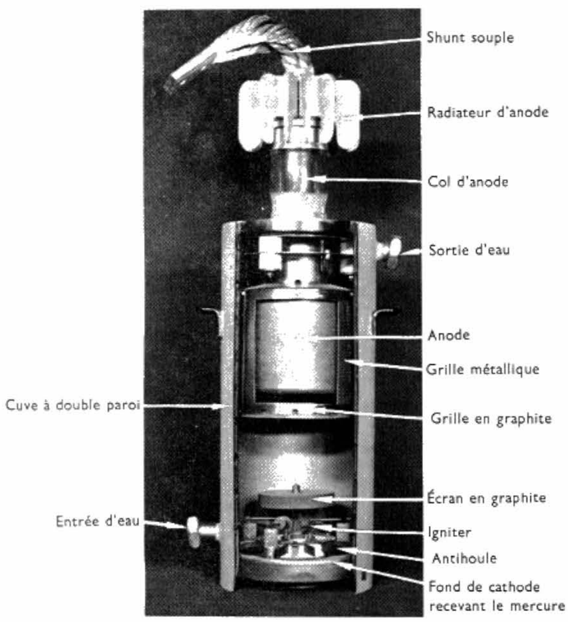


Fig. IV-131 — Coupe d'un ignitron

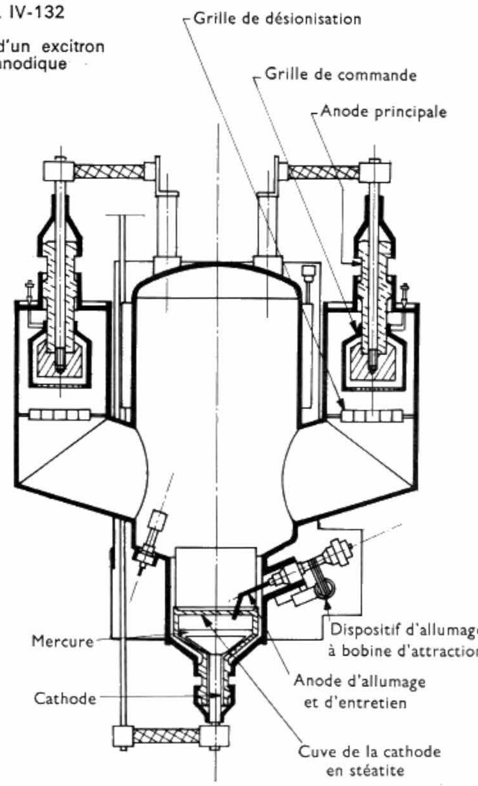
— *Redresseurs à semiconducteurs.* — Les circuits principaux sont équipés de *redresseurs à jonction* au silicium ; le germanium, vite évincé, n'a fait l'objet que de rares applications. Un ensemble redresseur se compose de cellules assemblées en série et en parallèle pour offrir les caractéristiques voulues de tension et de courant. Les cellules se présentent le plus souvent sous l'un des deux aspects montrés par la figure IV-133 : boîtier avec tresse pour les cellules dites « bouchon » et cellules « double face ». Les premières se vissent dans un radiateur ; les secondes sont enserrées entre deux radiateurs, ce qui améliore la dissipation calorifique et les rend aptes à supporter de forts courants.

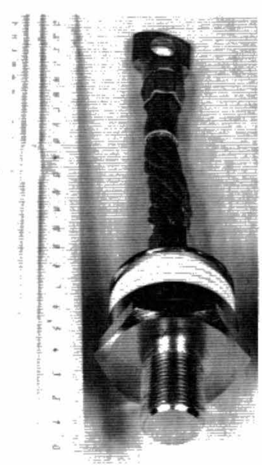
Les cellules sont soit des diodes qui assurent le redressement du courant, soit des thyristors qui possèdent une électrode de commande (la gâchette) permettant d'assurer le réglage de la tension redressée.

b) *Montages redresseurs fondamentaux.* — Les engins moteurs à redresseurs relèvent de l'un ou l'autre des deux schémas fondamentaux classiques (fig. IV-134) :

Fig. IV-132

Coupe d'un excitron bi-anodique



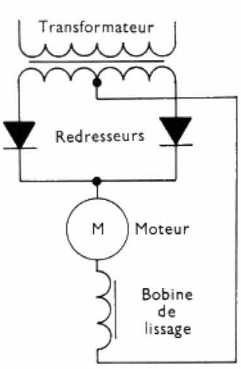




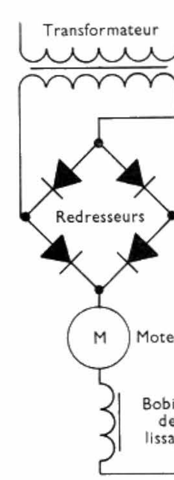
Diode « double face » sans radiateur ; 3 000 V ; 600 A

Fig. IV-133

Diode « bouchon » 2 400 V ; 250 A (*S.N.C.F.*)



Montage va-et-vient ou bivalve



Montage en pont

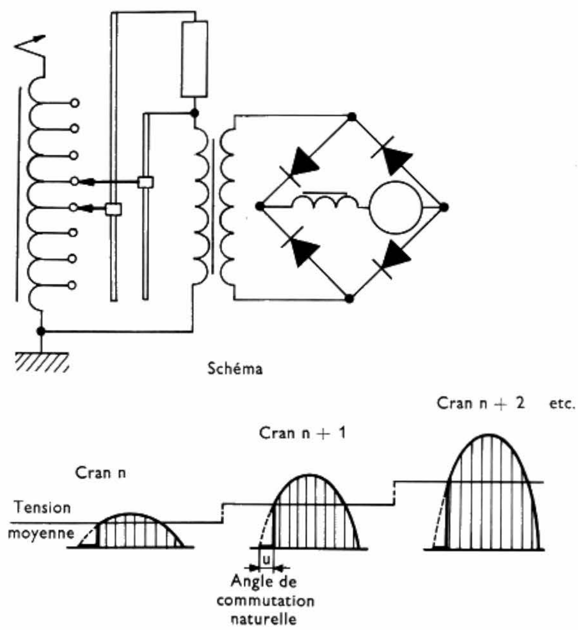
Fig. IV-134 — Montages fondamentaux utilisés sur les engins à redresseurs

le montage en *va-et-vient*, ou bivalve, et le montage en *pont*. Ils sont équivalents quant aux formes de la tension et du courant redressés. Ce sont des considérations technologiques et de dimensionnement du transformateur qui font choisir l'un ou l'autre. Avec les redresseurs à vapeur de mercure climatisés par eau et le plus souvent à cathode non isolée de la cuve, le montage en va-et-vient, permettant d'avoir des cuves au même potentiel, a été très employé. Au contraire, avec les redresseurs à semiconducteurs, le montage en pont est d'usage quasi général car il apporte un allègement du transformateur dont le secondaire est mieux utilisé. La tension délivrée par le montage redresseur est, au redressement près, calquée sur la tension d'alimentation. Néanmoins, afin que le courant soit très proche d'un courant continu, l'inductance du moteur est presque toujours complétée par celle d'une bobine de lissage. De plus, le renforcement de l'effet de carcasse du moteur ou l'utilisation d'un faible shuntage permanent des inducteurs (V. § 5.4.3, 2°) permet de rendre le flux et la f.é.m. du moteur pratiquement continus malgré l'ondulation résiduelle du courant. Pour des puissances modérées, il est possible d'alimenter le moteur sans bobine de lissage; il s'agit alors d'un moteur dit « à tension ondulée » (V. § 5.4.3).

c) *Réglage de la tension; influence sur le facteur de puissance.* — Trois procédés sont utilisables :

— Réalisation en aval de l'ensemble transformateur-redresseurs d'un schéma de locomotive à courant continu avec rhéostat de démarrage et changement de couplage des moteurs.

— Emploi d'un transformateur à rapport variable pour régler *l'amplitude* de la tension (fig. IV-135) : la valeur moyenne de la tension redressée varie de manière discontinue.



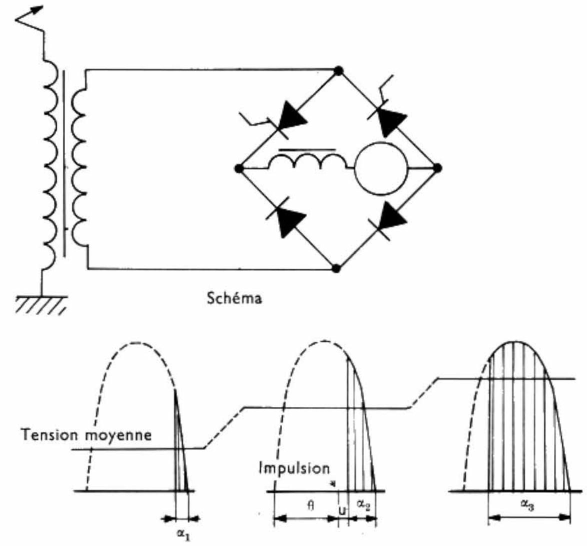
Variation discontinue de la tension moyenne redressée

Fig. IV-135 — Réglage de tension par graduateur

— Réglage de l'angle d'amorçage de redresseurs contrôlables, pour n'utiliser qu'une fraction de l'onde de tension (fig. IV-136) : la valeur moyenne de la tension redressée varie alors de manière continue.

Le premier procédé n'est employé que sur quelques engins polycourants devant fonctionner en courant continu. Le second, presque exclusivement utilisé jusqu'à l'avènement du thyristor de puissance (1963), se pratique avec les mêmes variantes que sur les locomotives à moteurs monophasés à collecteur (V. § 5.4.1, 1°).

Le troisième est utilisable avec les redresseurs à vapeur de mercure et avec les thyristors. Les diodes ne permettent pas ce genre de réglage à moins de leur associer des amplificateurs magnétiques qui, eux, peuvent être débloqués

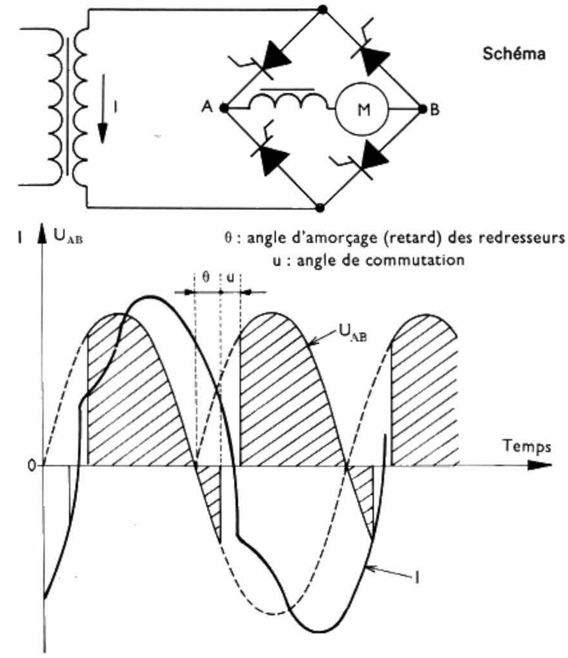


θ : angle d'amorçage (retard) des redresseurs
u : angle de commutation
α : angle variable de conduction des redresseurs

Variation continue de la tension moyenne redressée

Fig. IV-136 — Réglage de tension par retard d'amorçage des redresseurs

avec retard variable. L'apparition des thyristors a toutefois retiré tout intérêt à cette dernière solution pénalisée par sa masse. D'une manière générale, l'amorçage retardé des redresseurs altère le facteur de puissance, d'autant plus que le retard est important, mais de façon différente selon la



Courant dans le transformateur : trait fort
Tension redressée : zones hachurées

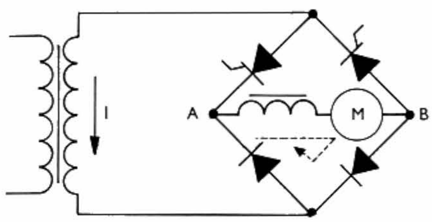
Fig. IV-137 — Schéma et diagramme des tensions et courant d'un montage redresseur totalement commandé

catégorie fondamentale dans laquelle se range le montage redresseur, soit :

— *montage totalement commandé :* dont tous les bras sont constitués par des thyristors comme le pont de la figure IV-137 ;

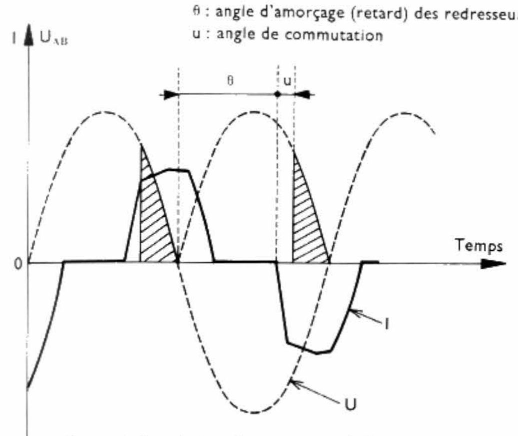
— *montage semi-commandé ou mixte,* dont certains bras sont constitués de diodes comme le pont de la figure IV-138 (page suivante). L'altération du facteur de puissance est plus importante avec les montages totalement

Schéma



Lorsque les thyristors ne conduisent pas, le courant qui traverse le moteur passe par le circuit dit de « roue libre » ou de « décharge » (en pointillés sur la figure)

θ : angle d'amorçage (retard) des redresseurs
u : angle de commutation

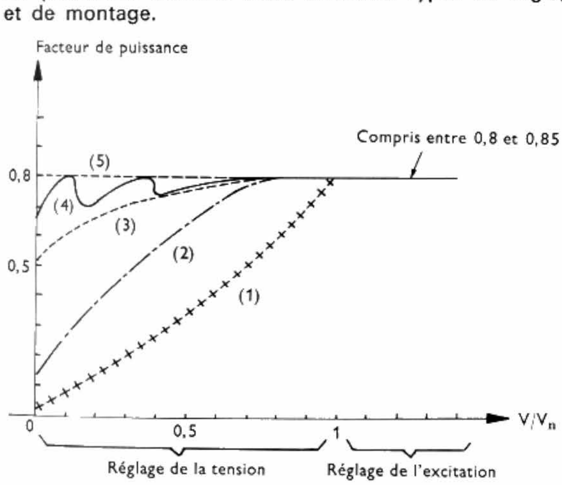


Courant dans le transformateur : trait fort
Tension redressée : zones hachurées

Fig. IV-138 — Montage redresseur semi-commandé

commandés qui, en contrepartie, sont les seuls à permettre le freinage par récupération.

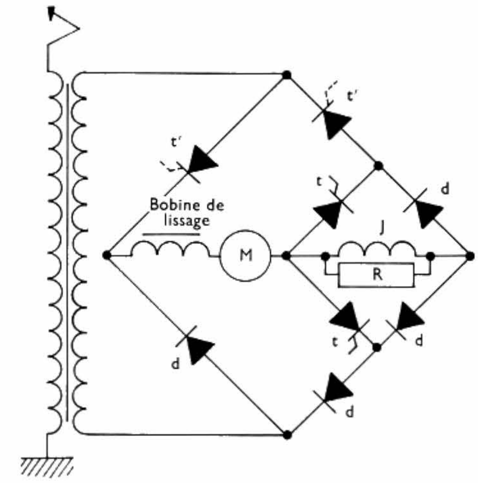
L'association de plusieurs ponts en série débloqués successivement permet de limiter le réglage à une fraction de la tension totale et relève le facteur de puissance. La figure IV-139 donne, en fonction de la vitesse, les facteurs de puissance obtenus avec différents types de réglage et de montage.



1. Montage totalement commandé
2. Montage semi-commandé
3. Réglage par graduateur sur la H.T.
4. Association en série de quatre ponts semi-commandés débloqués successivement
5. Réglage par graduateur sur la B.T.

Fig. IV-139 — Facteur de puissance en fonction de la vitesse suivant les différents modes de réglage

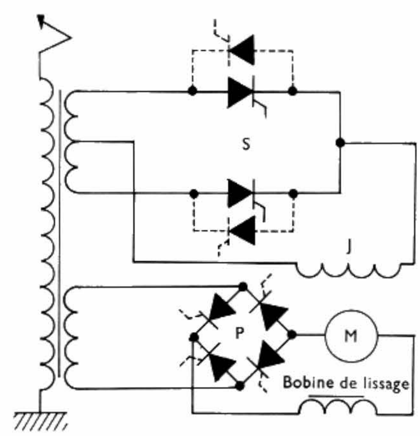
d) *Réduction d'excitation et caractéristiques effort-vitesse.* — En plus du réglage de tension pratiqué selon les modes décrits précédemment, le réglage de la vitesse, pour des valeurs suffisamment grandes de celle-ci, est obtenu par réduction de l'excitation. Celle-ci peut être effectuée soit de manière discontinue en shuntant les inducteurs au



a) Excitation série, shuntage par thyristors

J : inducteurs
d : diodes
t' : diodes ou thyristors de réglage de tension
M : induit du moteur
R : résistance de shuntage permanent
t : thyristors de shuntage

b) Excitation séparée



P : pont d'induit (à diodes, à thyristors, ou mixte)
S : montage à thyristors en va-et-vient pour excitation
Le montage des thyristors en antiparallèle (pointillés) permet de réaliser statiquement l'inversion du sens de rotation du moteur

Fig. IV-140 — Réglage continu de l'excitation sur locomotives à redresseurs

moyen de résistances comme sur les locomotives à courant continu (V. § 5.2.1, 2°), soit de manière continue (fig. IV-140) si les inducteurs sont shuntés par des thyristors ou en recourant à l'excitation séparée facilement réalisable avec un montage à thyristors. Le réglage de l'excitation, après déblocage complet des thyristors de réglage de tension, conserve au facteur de puissance sa valeur maximale.

La figure IV-141 (V. page suivante) montre comment se présente le diagramme effort-vitesse d'une locomotive à redresseurs. Si le réglage de la tension et celui de l'excitation sont continus, la zone d'utilisation est entièrement couverte sans caractéristiques distinctes. Les avantages du réglage continu sont les mêmes que ceux déjà indiqués pour les locomotives à courant continu (V. § 5.2, 3°).

5.4.2. Freinage électrique des locomotives monophasées

1° *Freinage par récupération*

a) *Locomotives à moteurs monophasés à collecteur.* Pour assurer la stabilité du freinage on adopte l'excitation séparée des moteurs ce qui empêche l'amorçage spontané d'un courant continu se fermant par le transformateur. Si les inducteurs sont alimentés directement par le transformateur, la f.é.m. des moteurs fonctionnant en générateurs est en quadrature avec la tension délivrée par le transformateur (V. fig. IV-142). Le courant récupéré est alors limité par une inductance. L'effort de retenue est

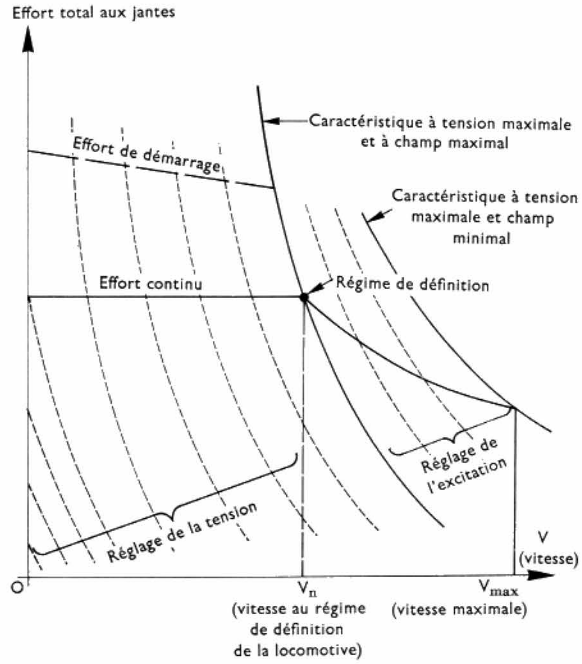


Fig. IV-141 — Diagramme effort-vitesse d'une locomotive à redresseurs. Les courbes en pointillés correspondent à un réglage discontinu de la tension et de l'excitation

Fig. IV-142 — Freinage par récupération avec f.é.m. des génératrices en quadrature avec la tension du transformateur

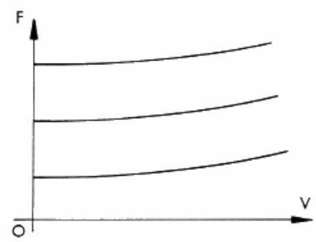


Schéma de principe (montage de Behn-Eschenburg)

Caractéristiques effort-vitesse

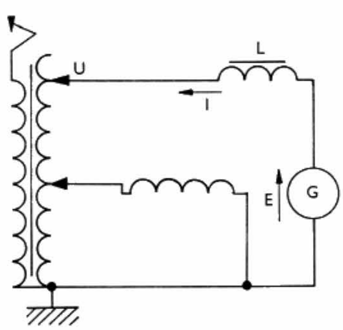
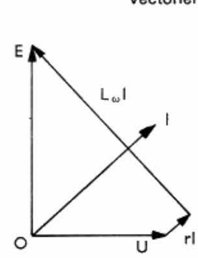


Diagramme vectoriel



presque indépendant de la vitesse, le freinage est donc très facile. Pour obtenir une f.é.m. des moteurs sensiblement en phase avec la tension, afin d'améliorer le facteur de puissance, l'inductance des inducteurs est compensée par une capacité, éventuellement par l'intermédiaire d'un transformateur d'adaptation (fig. IV-143). Les caractéristiques effort-vitesse obtenues sont très tombantes et l'excitation doit être ajustée en fonction de la vitesse. Parmi d'autres procédés, qui permettent d'agir sur le déphasage entre f.é.m. des moteurs et tension en ligne, il convient de mentionner l'emploi d'un ensemble redresseur-onduleur autonome pour fournir l'excitation.

b) *Locomotives à groupe tournant.* — Les groupes tournants monophasé-continu ou monophasé-triphasé se prêtent tout naturellement au freinage par récupération. Ils assurent un freinage très souple utilisable jusqu'à l'arrêt.

c) *Locomotives à redresseurs commandés.* — Pour assurer la stabilité du freinage il est nécessaire de recourir

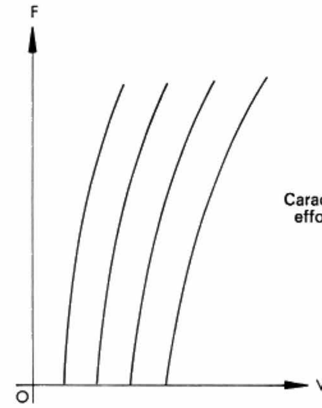


Fig. IV-143

Freinage par récupération avec déphasage réduit entre f.é.m. des génératrices et tension du transformateur

Caractéristiques effort-vitesse

Schéma de principe

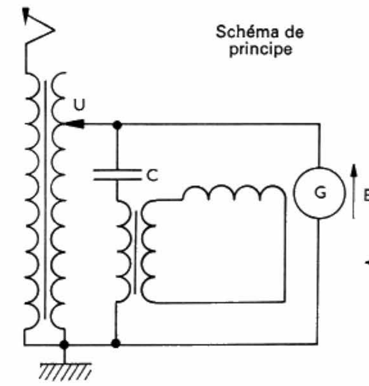
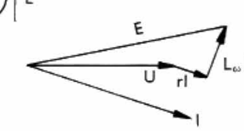


Diagramme vectoriel



à l'excitation séparée des « moteurs » ; la f.é.m. *E* doit avoir un sens opposé à celui de la f.c.é.m. que présente le moteur durant le fonctionnement en traction. Il en est de même de la f.c.é.m. moyenne qui lui est opposée par l'ensemble redresseur qui est alors utilisé en onduleur (fig. IV-144 a, b et c). Le courant I conserve son sens comme l'exigent les redresseurs, mais la puissance EI change de signe.

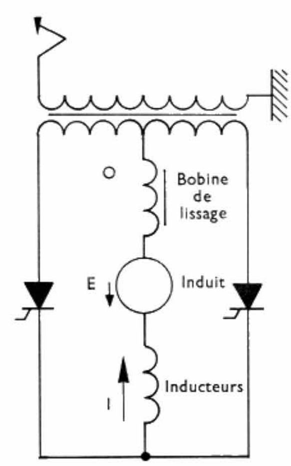
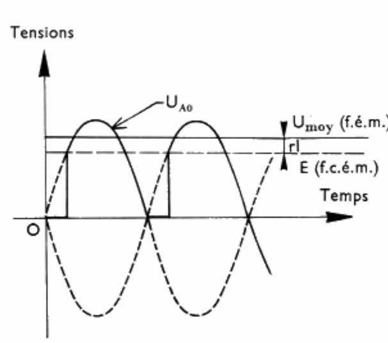
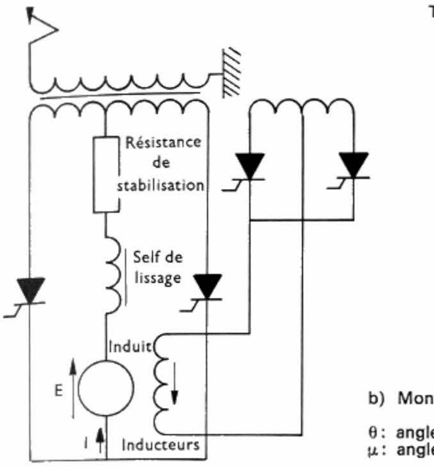


Fig. IV-144

Montage permettant le freinage par récupération sur les locomotives à redresseurs

a) Montage durant la traction





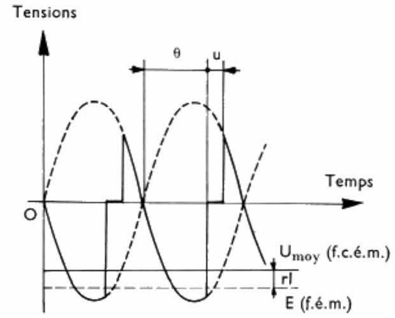
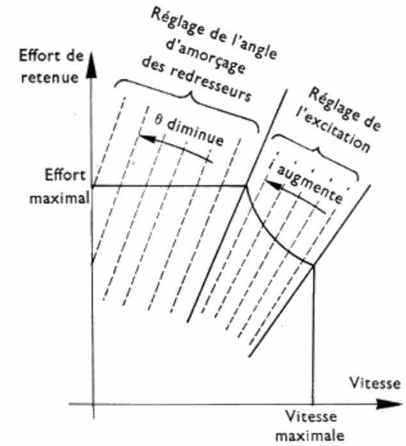


Fig. IV-144

b) Montage durant le freinage par récupération

θ : angle d'amorçage (retard) des redresseurs
μ : angle de commutation des redresseurs



c) Caractéristiques effort-vitesse

Pour maintenir l'effort de retenue quand la vitesse diminue, l'excitation est augmentée jusqu'à sa valeur maximale ; ensuite la f.c.é.m. de l'onduleur est diminuée en réduisant le retard θ des redresseurs. L'utilisation du réglage continu permet de couvrir toute la zone d'utilisation sans caractéristiques distinctes.

2° *Freinage rhéostatique.* — Le freinage rhéostatique, contrairement au freinage par récupération, constitue un dispositif de sécurité pouvant fonctionner même en cas de manque de tension en ligne. Comme pour les locomotives à courant continu il peut être prévu avec auto-excitation des moteurs ou mieux avec une excitation séparée (emploi d'une batterie d'accumulateurs ; V. § 5.2.1, 4°).

Le freinage rhéostatique nécessite l'installation de résistances réservées pour cet usage. Son utilisation peut être limitée aux cas d'absence de tension en ligne, le freinage par récupération étant utilisé en situation normale.

5.4.3. Moteurs de traction

1° *Moteur monophasé à collecteur à excitation série*

a) *Adaptation du moteur série à courant continu.* — Théoriquement, un moteur série à courant continu peut être alimenté en courant alternatif, puisque le sens du courant s'inverse simultanément dans l'induit et l'inducteur et donc que le sens du couple ne change pas (il devient pulsatoire). En pratique, pour obtenir un fonctionnement acceptable avec un tel moteur il est nécessaire de réaliser le circuit magnétique du stator en tôles feuilletées (pour réduire les courants de Foucault) et d'ajouter sur le stator un enroulement de compensation en série avec l'induit ou fermé sur lui-même (pour réduire l'auto-inductance du moteur et améliorer ainsi son facteur de puissance). Les grandeurs caractéristiques, force électromotrice et couple d'un tel moteur sont définies par les relations déjà indiquées pour le courant continu (V. t. 1, Électrotechnique, chap. 19).

b) *Commutation.* — Dans le cas d'un moteur alimenté en courant continu les spires en commutation sous les balais sont le siège de forces électromotrices d'ordre *dynamique* (provoquées, d'une part, par l'inversion du sens du courant et, d'autre part, par le flux de réaction d'induit) qui sont annulées, ou tout au moins fortement atténuées par l'action des pôles de commutation et de l'enroulement de compensation.

Dans le cas de l'alimentation en courant alternatif, aux phénomènes indiqués ci-dessus se superpose l'apparition d'une force électromotrice statique dite de « transformation » dans les spires en commutation. Elle est induite par le flux alternatif principal qui est en quadrature avec les f.é.m. dynamiques précitées. La f.é.m. résultante de commutation est donc la somme des f.é.m. dynamiques, dont les amplitudes sont proportionnelles à la vitesse de rotation et à l'intensité du courant, et de la f.é.m. statique dont l'amplitude ne dépend que du flux et de la fréquence du courant d'alimentation. Cette f.é.m. résultante présente un certain déphasage par rapport au courant traversant le moteur ; pour la compenser en grandeur et en phase, il est nécessaire de déphaser le courant dans les pôles de commuta-

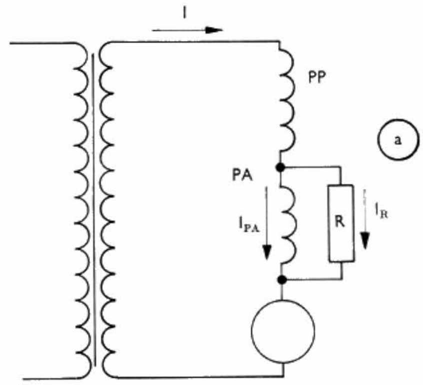
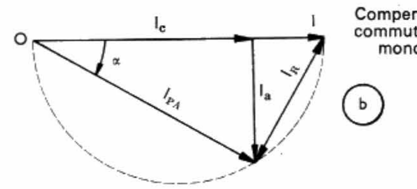
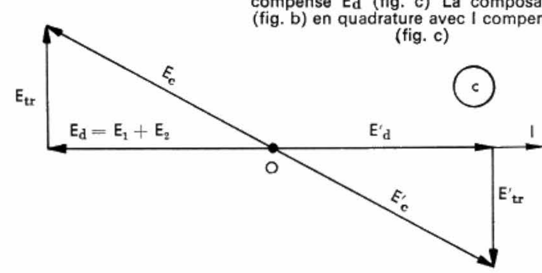


Fig. IV-145

Compensation des f.é.m. de commutation d'un moteur monophasé à collecteur



La composante I_c (fig. b) en phase avec I compense E_d (fig. c) La composante I_a (fig. b) en quadrature avec I compense E_{tr} (fig. c)



tion en les shuntant par une résistance (fig. IV-145). Cet artifice provoque un déphasage de valeur constante α qui convient pour une vitesse bien déterminée ; pour toute autre valeur de celle-ci la compensation est incomplète et la commutation se fait avec étincelles. En particulier, à vitesse nulle, au moment où le moteur est mis sous tension et avant que le train ne soit « décollé », la f.é.m. statique existe seule sans aucune possibilité de compensation ; dans les spires court-circuitées par les balais elle provoque alors un courant important susceptible de détériorer ces derniers, ainsi que les lames intéressées du collecteur, si l'immobilisation de l'induit se prolonge. Pour limiter ces inconvénients il est recommandé de limiter la valeur maximale de la f.é.m. de transformation aux environs de 3 à 4 V.

Au prix d'une complication de l'appareillage il est possible de réaliser plusieurs valeurs de déphasage du courant

dans les pôles de commutation en utilisant plusieurs valeurs de résistances ainsi que des inductances et des condensateurs afin de réaliser la compensation de la f.é.m. résultante de commutation pour plusieurs vitesses (locomotives BB 13000 de la S.N.C.F.).

c) *Répercussion des contraintes de commutation sur les dispositions constructives.* — La nécessité de limiter la f.é.m. de transformation conduit à réduire le flux par pôle et la fréquence du courant d'alimentation ($16\frac{2}{3}$ ou 25 Hz). La limitation du flux par pôle se répercute dans le même sens sur la tension d'alimentation du moteur et sur la puissance utile par pôle (valeur maximale : 70 à 80 kW). Donc à puissance égale, un moteur monophasé à collecteur comporte un plus grand nombre de pôles (de 10 à 24) et est alimenté sous une tension plus faible (180 à 550 V) qu'un moteur à courant continu. Corrélativement, l'intensité du courant est plus grande et le collecteur est très volumineux. De plus, il faut de nombreux balais par ligne et autant de lignes de balais que de pôles, tous équipements onéreux tant à la construction qu'en entretien.

Ces sujétions deviennent encore plus astreignantes dans le cas d'un moteur alimenté à la fréquence industrielle. En effet, pour une même valeur limite de la f.é.m. de transformation il faut diviser par trois le flux par pôle avec les conséquences déjà mentionnées en ce qui concerne la puissance et la tension d'alimentation. Pour surmonter ces difficultés, il convient de recourir à certaines dispositions particulières :

— Mise en série de deux moteurs dont les arbres sont liés mécaniquement.

— Bobinage d'induit double parallèle (fig. IV-146) avec lequel la tension entre lames de collecteur est réduite de moitié (locomotives CC 25000 de la S.N.C.F.).

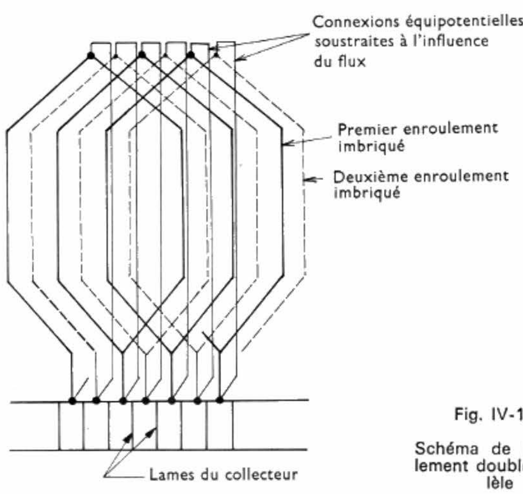


Fig. IV-146

Schéma de l'enroulement double-parallèle

— Connexions résistantes entre lames de collecteur et bobinage d'induit (fig. IV-147) permettant d'admettre une f.é.m. de transformation de valeur plus grande pour une même intensité du courant de court-circuit sous les balais (locomotives BB 13000 de la S.N.C.F.). À noter que cette solution a également été utilisée au début de la construction des moteurs à $16\frac{2}{3}$ Hz (moteur Lamme).

2° *Moteur à courant ondulé.* — Dans un moteur à courant continu alimenté par un redresseur, la composante alternative du courant (à 100 Hz ou $33\frac{1}{3}$ Hz selon que l'alimentation est à 50 Hz ou $16\frac{2}{3}$ Hz) donne naissance à une composante alternative du flux qui engendre dans la spire en commutation une f.é.m. statique, comparable à celle qui existe dans le moteur monophasé. Pour éviter celle-ci il convient de « lisser » le courant par adjonction d'une inductance (bobine de lissage) et de dériver hors des

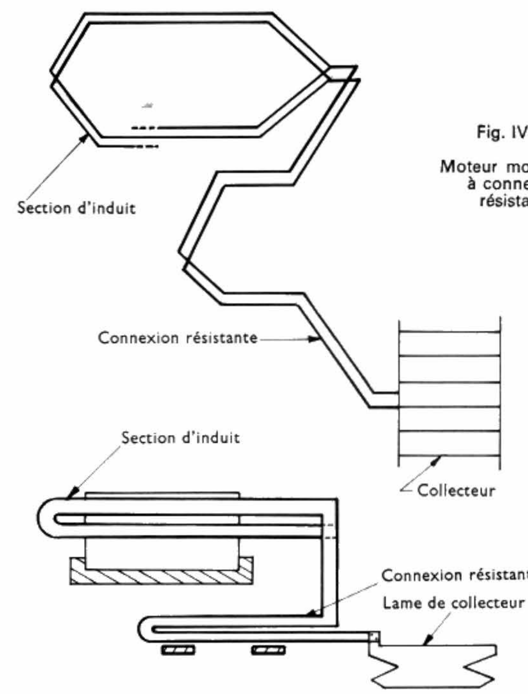


Fig. IV-147

Moteur monophasé à connexions résistantes

pôles principaux la composante alternative ou d'étouffer le flux qui en résulte.

Sur les moteurs à carcasse massive, du fait des caractéristiques magnétiques de celle-ci, l'ondulation du flux principal est automatiquement limitée. Au besoin cette action peut être complétée par des cadres fermés disposés autour des pôles principaux.

Sur les moteurs à carcasse feuilletée, flux et courant sont en phase car il n'y a pas d'amortissement. Une grande résistance connectée en parallèle avec les pôles principaux dérive environ 10 % de la composante continue et 90 % de la composante alternative. Cette solution s'est généralisée car le réglage de la commutation en courant ondulé est plus facile à réaliser sur des moteurs entièrement feuilletés.

La tension maximale d'alimentation des moteurs n'étant pas imposée par la tension de la caténaire comme c'est le cas avec les locomotives à courant continu, il est possible de choisir pour valeur nominale de la tension celle qui conduit au dimensionnement optimal du moteur pour la puissance considérée.

3° *Moteur à tension ondulée.* — Ce type de moteur étant alimenté directement par le groupe transformateur-redresseur, la tension à ses bornes présente la même ondulation que la tension redressée. Il comporte obligatoirement un circuit magnétique, totalement feuilleté afin que les pertes dans le fer restent acceptables et que l'inductance soit importante. En effet, le moteur ou plus précisément ses inducteurs jouent en partie le rôle de bobine de lissage. L'entrefer doit être important pour éviter la saturation et les inducteurs ne peuvent pas être shuntés.

Cette construction permet la suppression de la bobine de lissage, mais conduit, à égalité de performances, à un moteur plus volumineux et plus lourd que le moteur à courant ondulé. En effet, d'une part, il faut ménager un grand entrefer, ce qui impose un nombre important d'ampères-tours et, d'autre part, l'impossibilité de régler la vitesse par shuntage des inducteurs oblige à utiliser une tension maximale d'alimentation plus grande pour conserver la même gamme d'utilisation de la locomotive. Cette augmentation de tension se répercute défavorablement sur le dimensionnement du transformateur et des redresseurs. Le moteur à tension ondulée se comporte remarquablement bien en régime transitoire (variations brusques de tension) en raison de son circuit magnétique entièrement feuilleté, qui évite l'amortissement du flux. Mais, du fait de la forme droite de sa caractéristique à vide (moteur non saturé) la réalisation du freinage rhéostatique (avec auto-excitation

des moteurs fonctionnant en génératrice) nécessite souvent des dispositions particulières (préexcitation) pour assurer un bon amorçage du freinage. Ce type de moteur est assez peu répandu ; il présente néanmoins un certain intérêt dans le cas d'alimentation à partir de courant alternatif à fréquence spéciale ($16\frac{2}{3}$ Hz) en raison de l'importance de la bobine de lissage qui serait nécessaire dans ce cas pour « lisser » correctement la tension d'alimentation.

5.4.4. Appareillage électrique des locomotives à courant monophasé

1° *Pantographes.* — Les pantographes des locomotives à courant monophasé 25 kV sont semblables à ceux des locomotives à courant continu mais les intensités étant alors relativement faibles, ils ne comportent qu'un seul archet « unipalette » (fig. IV-148) muni de deux ou de quatre lignes de barres de frottement, métalliques ou en charbon. La masse fictive du système articulé est voisine de 44 kg pour un pantographe ordinaire et de 32 kg pour un pantographe à cadre simplifié du type AM. Pour les infrastructures nouvelles à très grande vitesse (de 250 à 300 km/h), bien entendu dépourvues de passages à niveau, l'implantation de la caténaire à une altitude constante permet l'utilisation d'un pantographe dont le développement est limité à 0,40 m (V. fig. IV-118). Sa masse fictive (8,5 kg) représente environ le quart de celle d'un appareil utilisé sur les lignes actuelles. De même leur pression sur la caténaire est plus faible qu'en courant continu : 7 daN en statique et 13 daN environ à 160 km/h.

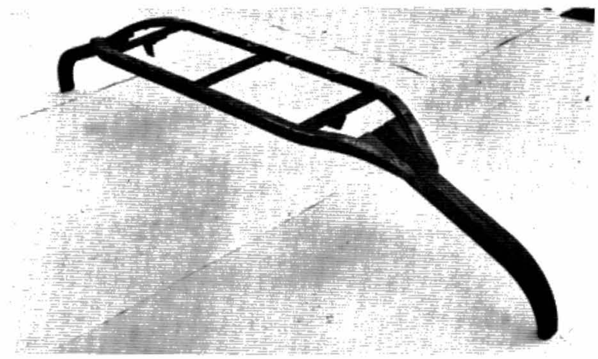


Fig. IV-148 — Archet unipalette à deux lignes de barres métalliques (*S.N.C.F.*)

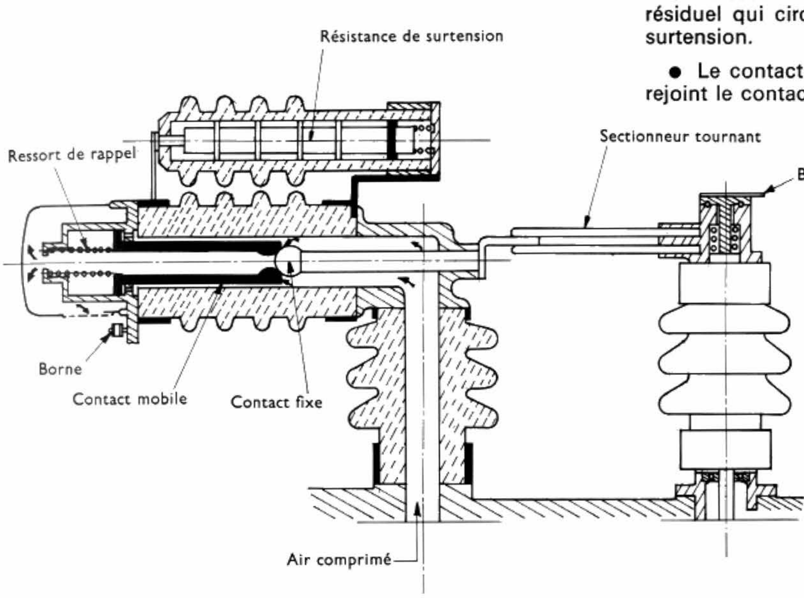


Fig. IV-149

Disjoncteur 25 kV à air comprimé ; dispositif de coupure H.T.

2° *Appareils de protection*

a) *Disjoncteur haute tension.* — Les disjoncteurs dans l'huile qui étaient de règle sur le matériel ancien sont maintenant abandonnés au profit des appareils à air comprimé ou à gaz isolant.

— *Disjoncteur à air comprimé* (fig. IV-149) : Cet appareil se compose essentiellement :

- d'une chambre de coupure renfermant les contacts fixe et mobile,
- d'un sectionneur tournant,
- d'une résistance limitatrice de surtension,
- d'un mécanisme de commande (non représenté sur la figure).

L'ouverture s'effectue en trois temps :

- Sous l'action de l'air comprimé admis dans la chambre de coupure le contact mobile se sépare du contact fixe en comprimant le ressort de rappel ; l'arc qui jaillit entre les contacts est soufflé par l'air comprimé.
- Le sectionneur tournant en s'ouvrant coupe le courant résiduel qui circulait à travers la résistance limitatrice de surtension.
- Le contact mobile, sous l'action du ressort de rappel, rejoint le contact fixe ; la coupure reste assurée par le sectionneur. La fermeture de l'appareil se limite donc à celle du sectionneur tournant.

— *Disjoncteur à hexafluorure de soufre* (fig. IV-150) : Les propriétés diélectriques de l'hexafluorure de soufre (SF_6) ont permis la réalisation d'un disjoncteur à soufflage automatique, la partie active de l'appareil étant enfermée dans une cuve contenant le gaz sous pression (3 à 4 bars).

— *Disjoncteur sous vide.* — Dans cet appareil les contacts sont enfermés dans une enceinte isolante dans laquelle règne un vide poussé. Il n'existe pas de dispositif de soufflage car, dans le vide, la diffusion des particules des contacts ionisés lors de la coupure est très rapide.

b) *Relais de protection.* — Les relais de contrôle des circuits à 25 kV sont des appareils à basse tension alimentés par l'intermédiaire de transformateurs de potentiel ou de transformateurs de courant.

La majorité des relais appartenant aux circuits à 1,5 kV sont identiques à ceux des locomotives à courant continu.

3° *Transformateur.* — Les conditions particulières d'utilisation d'un transformateur de traction imposent des calages d'enroulements et de circuit magnétique très soignés. Outre les chocs et les vibrations, ces appareils ont à supporter d'assez fréquents courts-circuits, plus ou moins violents, consécutifs à des défauts tels que retours d'arc des redresseurs à vapeur de mercure, flashes des moteurs, masses accidentelles, etc.

a) *Dispositions constructives des transformateurs de traction*

— *Circuit magnétique.* — Qu'il s'agisse d'un transformateur à colonnes ou cuirassé, le circuit magnétique est constitué de tôles à cristaux orientés à faibles pertes.

— *Bobinages.* — Les enroulements sont disposés soit concentriquement, soit en galettes enchevêtrées.

Les *enroulements concentriques* sont enroulés sur des cylindres de carton bakélisé ; des réglettes en carton stabilisé ou en papier bakélisé assurent le calage entre couches.

Les *enroulements à galettes enchevêtrées* sont souvent réalisés en bobines de faible épaisseur et de grande surface pour améliorer le refroidissement ; elles sont séparées par des écrans en carton bakélisé avec cales d'espacement collées et le tout, enserrant le circuit magnétique, est à son tour pressé par une cuve du type « cloche ».

L'entrée haute tension se fait par une traversée-condensateur. Un écran ou anneau de garde qui lui est relié, protège les premières spires contre les ondes à front raide, en linéarisant la répartition initiale de la tension. Sur les transformateurs alimentant des redresseurs au silicium, un écran parasurtensions, relié à la masse, est généralement interposé entre les enroulements haute et basse tension pour diminuer le coefficient de transmission par voie capacitive.

— *Isolement des conducteurs.* — L'emploi de papiers traités ou stabilisés permet d'admettre un échauffement du cuivre de 90 °C au lieu de 75 °C (valeur habituellement admise).

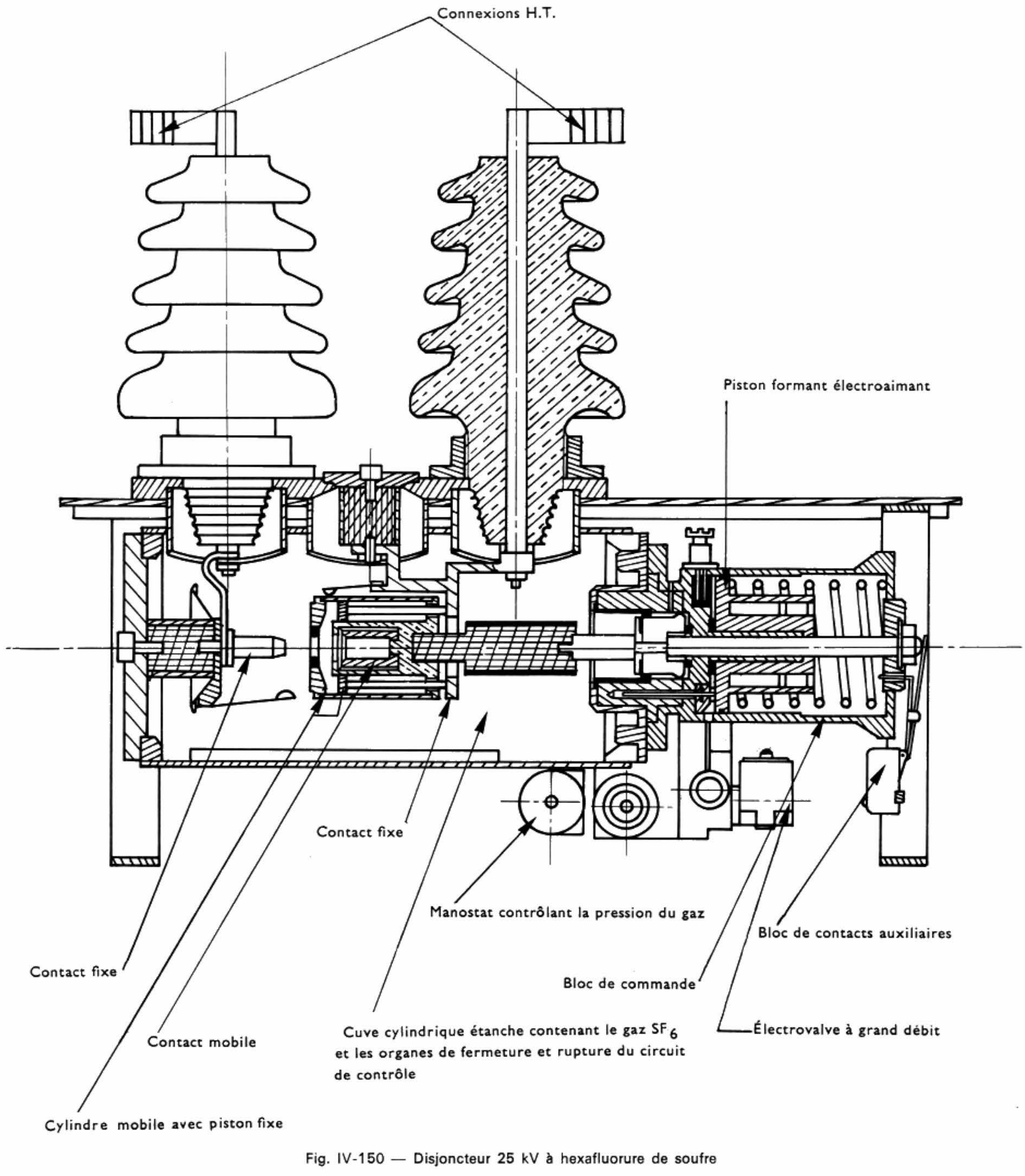
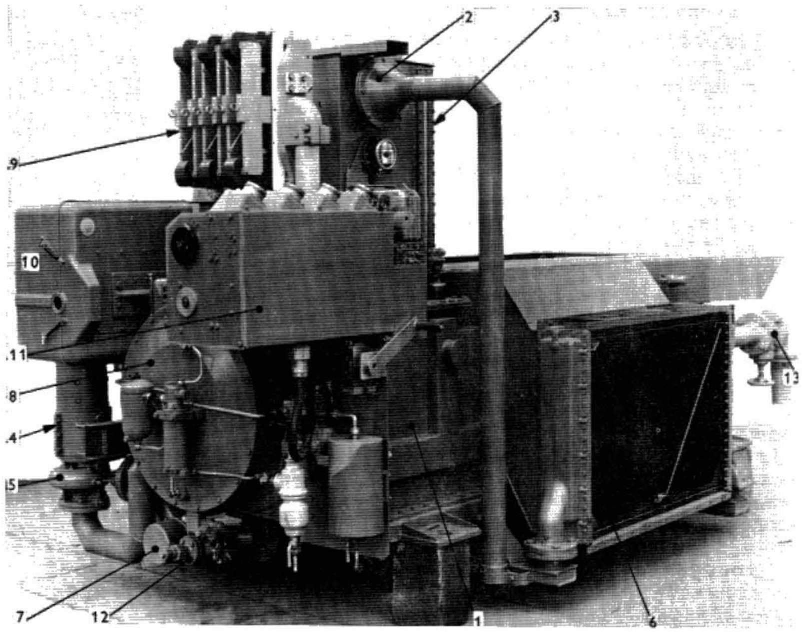


Fig. IV-150 — Disjoncteur 25 kV à hexafluorure de soufre

Fig. IV-151

Transformateur de locomotive et son graduateur

1. Cuve de transformateur
2. Diaphragme de sécurité (avec tuyauterie d'évacuation des gaz)
3. Conservateur d'huile avec niveau
4 et 5. Moteur et pompe à huile
6. Réfrigérant d'huile
7. Relais de circulation d'huile
8. Graduateur 25 kV
9. Contacteurs du graduateur
10. Servomoteur du graduateur
11. Capotage du tambour d'asservissement
12. Vanne de prise d'échantillon et de traitement d'huile
13. Vanne d'isolement du circuit d'huile



b) *Accessoires.* — Tous les transformateurs de traction possèdent les accessoires suivants: diaphragme ou soupape de sécurité (limitant la surpression résultant d'un défaut interne), conservateur et niveau d'huile, assécheur d'air, soupape de respiration, réfrigérants d'huile.

Un jeu de vannes permet le traitement de l'huile sans dépose du transformateur.

Sauf exceptions intéressant des puissances modérées (automotrices), la circulation d'huile est activée par une pompe entraînée par un moteur d'induction immergé ou un moteur à collecteur.

La ventilation des réfrigérants est forcée sur les locomotives; elle est parfois naturelle sur les automotrices.

c) *Nombre d'enroulements des transformateurs de traction.* — Le transformateur est soit à rapport fixe, soit à rapport variable, pour permettre le réglage de la tension d'alimentation des moteurs côté H.T. ou côté B.T. (V. fig. IV-128).

Le réglage H.T. conduit à associer un auto-transformateur et un transformateur à flux combinés pour réduire le dimensionnement du circuit magnétique.

Si le réglage utilise un graduateur, ce dernier est accolé au transformateur (fig. IV-151); cependant il se trouve dans une cuve à huile distincte.

Le secondaire est à point milieu sorti si le transformateur alimente un montage redresseur en va-et-vient.

Avec les redresseurs à semiconducteurs, sensibles aux surcharges, il est intéressant d'alimenter chaque moteur par un enroulement séparé (fig. IV-152) ; cette disposition permet d'avoir une réactance supérieure à la réactance normale en cas de court-circuit sur l'un des secondaires-traction.

Dans tous les cas un enroulement tertiaire alimente les circuits de chauffage du train. Parfois un transformateur distinct est réservé à l'alimentation des services auxiliaires; celle-ci peut aussi être assurée à partir d'une prise de l'enroulement de chauffage ou au moyen d'un enroulement supplémentaire.

d) *Dimensionnement des transformateurs de traction.* — Une locomotive ne fonctionnant pas en permanence à sa puissance nominale, le transformateur est habituellement dimensionné pour une puissance de traction inférieure à celle des moteurs. Sa constante de temps thermique plus importante permet, en général, de le dimensionner pour un courant égal à 80 % seulement du courant nominal des moteurs.

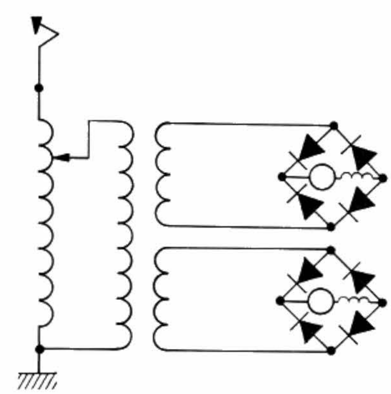


Fig. IV-152

Transformateur à plusieurs secondaires alimentant des moteurs de traction (secondaires-traction)

Le dimensionnement du transformateur, et par suite sa masse, sont influencés par le mode de réglage utilisé et éventuellement par le genre de montage redresseur alimenté. La masse des parties actives évolue sensiblement comme l'indique le tableau ci-après:

Type de transformateur	Montage alimenté	Masse des parties actives: ordre de grandeur relatif
À rapport fixe ou à réglage B.T.	Sans redresseur ou avec redresseurs en pont	1
	Avec redresseurs en va-et-vient	1,15
À réglage H.T.	Sans redresseur ou avec redresseurs en pont	1,27
	Avec redresseurs en va-et-vient	1,41

4° *Redresseurs*

a) *Dispositions générales.* — Les types de redresseurs utilisés ont été indiqués au paragraphe 5.4.1, 4°.

Les cellules élémentaires de redresseurs au silicium, diodes ou thyristors, sont assemblées en armoires ou en blocs cylindres ou semi-circulaires (fig. IV-153) qui peuvent avoir une ventilation propre ou commune avec un autre appareil : moteur de traction, réfrigérant de transformateur, etc. Les redresseurs peuvent aussi être disposés en nappe au sein d'une armoire d'appareillage ventilée ou sur la toiture de l'engin moteur où ils sont ventilés naturellement (solution utilisée sur des automotrices).

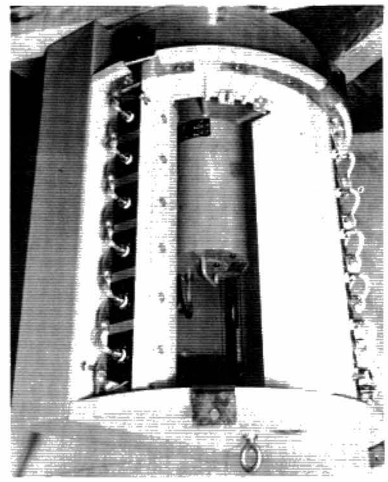


Fig. IV-153

Bloc semi-cylindrique de redresseurs ; diodes « bouchon » (BB 25100, 25150, 25 200) (*S.N.C.F.*)

b) *Protection des redresseurs au silicium.* — Les redresseurs au silicium sont très sensibles aux surtensions et aux surcharges. La protection contre les surtensions est assurée par des éléments résistances-condensateurs connectés aux bornes de chaque cellule, à la sortie du transformateur et parfois aussi en aval de l'ensemble redresseur.

La protection contre les surcharges est généralement assurée par le disjoncteur de la locomotive, le nombre de cellules en parallèle étant déterminé pour qu'elles puissent supporter sans dommage le courant de défaut pendant le temps d'ouverture du disjoncteur. Des appareils spéciaux de protection tels que disjoncteur ultra-rapide ou court-circuiteur sont rarement utilisés. Des coupe-circuit à fusion rapide d'un type « sans surtension » permettent de déceler une avarie de cellules et d'en limiter les conséquences. Cependant ces appareils, dont le dimensionnement optimal est délicat, sont rarement employés. À noter qu'un pont à thyristors peut s'autoprotéger contre les surcharges par la suppression des impulsions de gâchettes dès l'apparition d'un défaut.

5° *Appareils de commutation du circuit de puissance*

a) *Graduateur.* — Le graduateur utilisé en courant monophasé, pour réaliser le réglage sur un enroulement haute ou basse tension du transformateur, diffère de celui utilisé en courant continu (pour éliminer le rhéostat) par la présence d'une résistance *de passage de crans* qui évite la mise en court-circuit de la portion d'enroulement comprise entre deux prises consécutives.

Comme le montre la figure IV-154, cette résistance est :

— connectée à chaque fraction d'enroulement avant son insertion,

— en circuit dans les intercrans lorsque le circuit de traction est relié à deux prises consécutives du transformateur,

— court-circuitée sur les crans.

Le sélecteur à rouleaux immergés dans l'huile est de même conception que celui du graduateur utilisé en courant continu.

b) *Autres appareils.* — Les autres appareils de commutation du circuit de puissance (inverseurs, commutateurs, contacteurs, etc.) sont identiques à ceux utilisés sur les locomotives à courant continu.

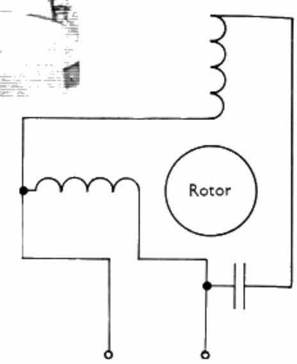


Fig. IV-155

Moteur monophasé à phase auxiliaire capacitive

6° *Services auxiliaires.*

a) *Groupes tournants.* — En plus des services auxiliaires habituels des engins à courant continu (groupes compresseurs et ventilateurs) le matériel monophasé comporte d'autres servitudes : pompe de circulation d'huile du transformateur, ventilateurs des réfrigérants d'huile, des redresseurs, des bobines de lissage, groupe motopompe de circulation d'eau dans le cas des engins équipés de redresseurs ioniques, etc.

L'alimentation des moteurs des groupes auxiliaires est réalisée à partir d'une tension monophasée (220 ou 380 V) fournie par un enroulement du transformateur principal ou par un transformateur spécial suivant l'une des dispositions ci-après qui diffèrent par le type de moteurs utilisés :

— *Moteurs monophasés.* — Pour les faibles puissances, jusqu'à 5 kW, il est possible d'utiliser des moteurs asynchrones monophasés à démarrage par phase auxiliaire avec condensateur (V. fig. IV-155). Pour des puissances plus

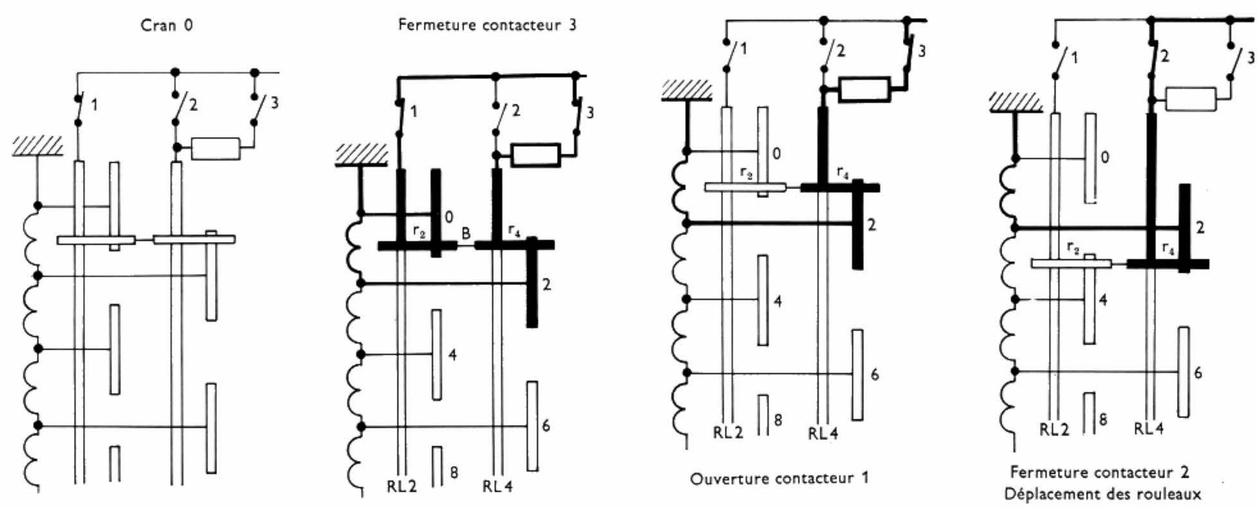


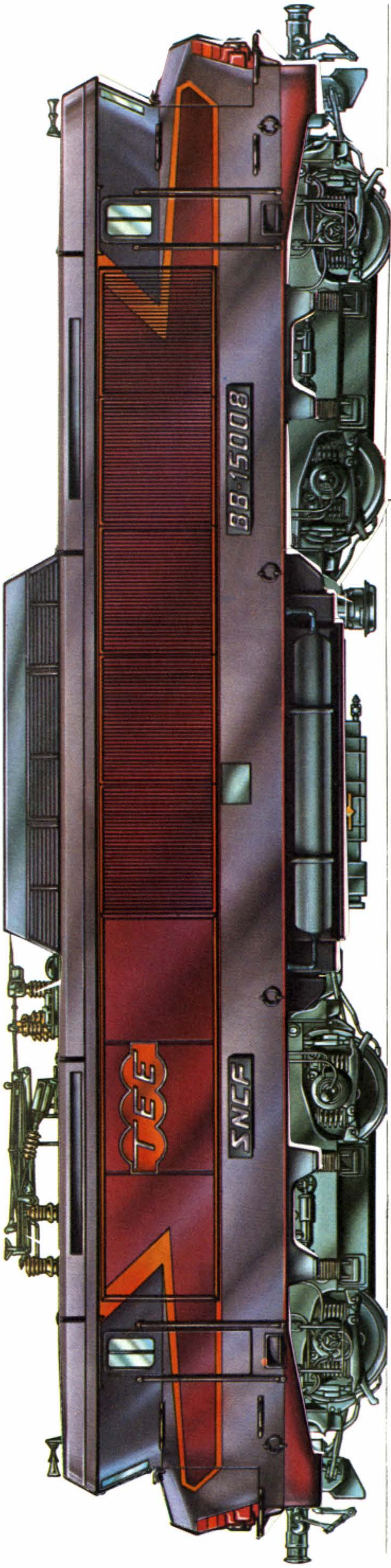
Fig. IV-154 — Séquences de fonctionnement d'un graduateur haute tension

Locomotive BB 15000

ALSTHOM
MTE

1. Pantographe
2. Disjoncteur
3. Bloc rhéostatique
4. Sécheur d'air et réfrigérant
5. Bloc batterie
6. Bloc des protections
7. Bloc des thyristors
8. Groupe moteur compresseur
9. Réfrigérant du transformateur
10. Transformateur principal
11. Capteur de préannonce
12. Réducteur
13. Bogie complet
    équipé de son moteur de traction
    et du réducteur
14. Moteur de traction
15. Pupitre de conduite

Les représentations de profil et de face, ci-contre, sont dans le rapport $\frac{1}{2}$.



Locomotive BB 15000

ALSTHOM
MTE



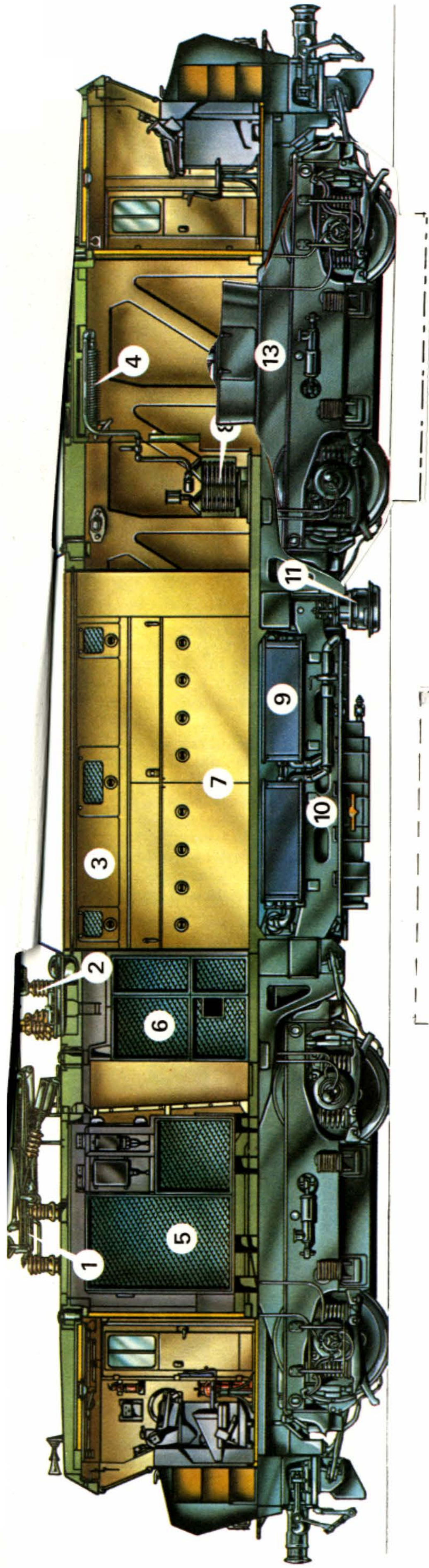
ARISTIDE QUILLET, Éditeur

Locomotive BB 15000

ALSTHOM
MTE

1. Pantographe
2. Disjoncteur
3. Bloc rhéostatique
4. Sécheur d'air et réfrigérant
5. Bloc batterie
6. Bloc des protections
7. Bloc des thyristors
8. Groupe moteur compresseur
9. Réfrigérant du transformateur
10. Transformateur principal
11. Capteur de préannonce
12. Réducteur
13. Bogie complet
    équipé de son moteur de traction
    et du réducteur
14. Moteur de traction
15. Pupitre de conduite

Les représentations de profil et de face, ci-contre, sont dans le rapport $\frac{1}{2}$.



Locomotive BB 15000

ALSTHOM
MTE



ARISTIDE QUILLET, Éditeur

Locomotive BB 15000

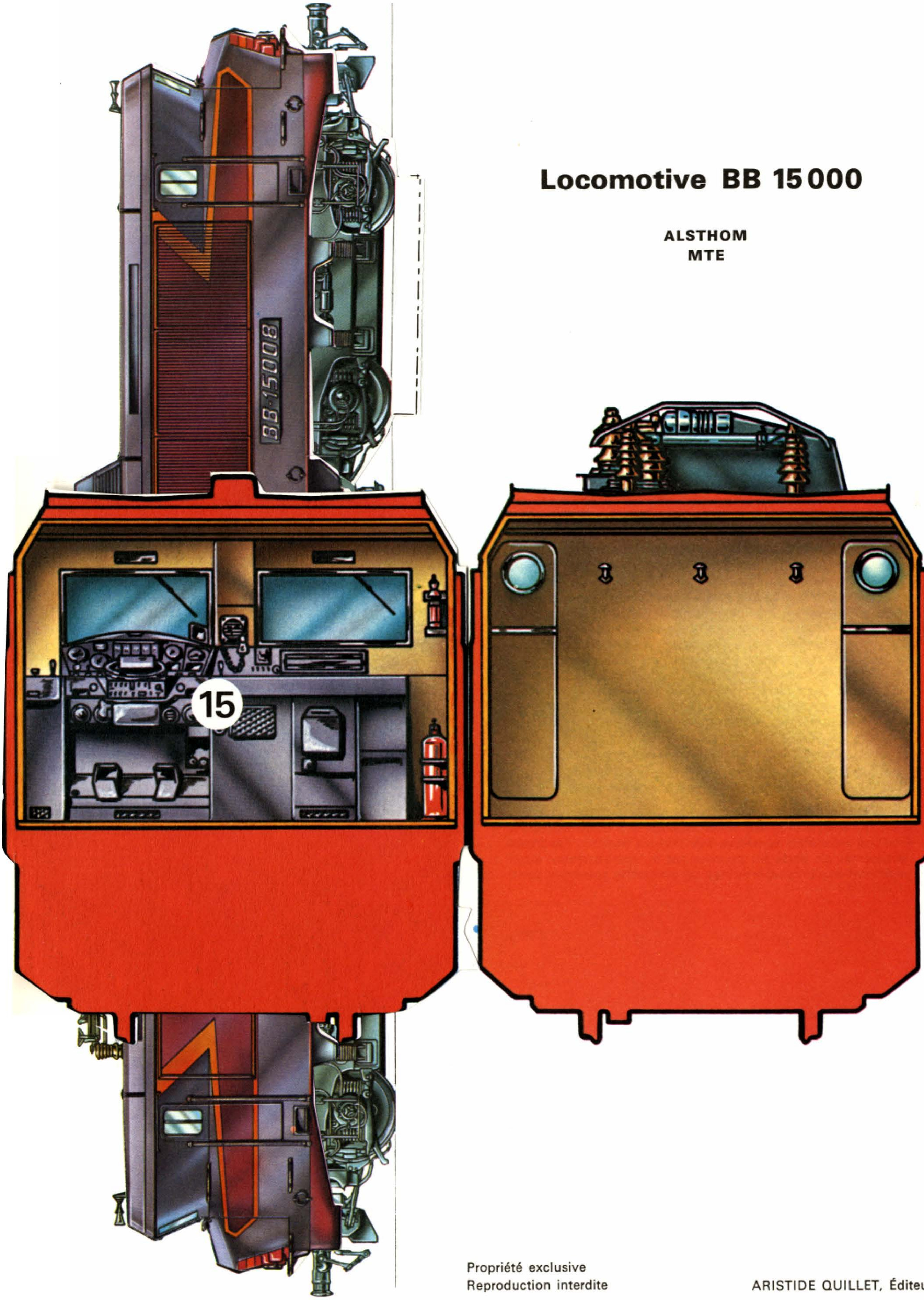
ALSTHOM
MTE

1. Pantographe
2. Disjoncteur
3. Bloc rhéostatique
4. Sécheur d'air et réfrigérant
5. Bloc batterie
6. Bloc des protections
7. Bloc des thyristors
8. Groupe moteur compresseur
9. Réfrigérant du transformateur
10. Transformateur principal
11. Capteur de préannonce
12. Réducteur
13. Bogie complet
    équipé de son moteur de traction
    et du réducteur
14. Moteur de traction
15. Pupitre de conduite

Les représentations de profil et de face, ci-contre, sont dans le rapport $\frac{1}{2}$.

Locomotive BB 15000

ALSTHOM
MTE



ARISTIDE QUILLET, Éditeur

grandes il est nécessaire de recourir à des moteurs monophasés à collecteur. En raison des sujétions de commutation, cette solution, assez répandue sur le matériel à $16\frac{2}{3}$ Hz, est rarement utilisée en courant industriel à 50 Hz.

— *Moteurs triphasés.* — Les moteurs asynchrones triphasés à cage sont alimentés à partir d'un convertisseur monophasé-triphasé dit « groupe Arno » constitué par un moteur asynchrone à cage dont le stator comporte un bobinage triphasé, couplé en étoile, et alimenté entre deux phases en courant monophasé (fig. IV-156). Le lancement s'opère en alimentant temporairement la troisième phase à travers une résistance pour provoquer le déphasage nécessaire à la création d'un champ tournant.

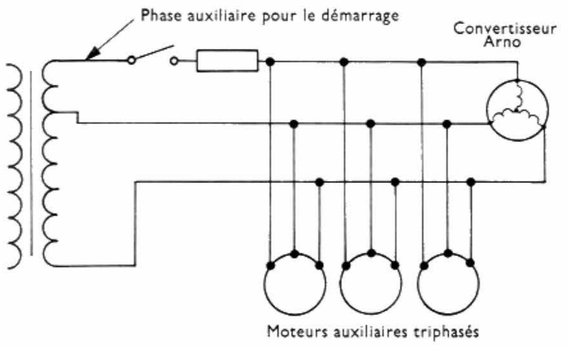


Fig. IV-156 — Alimentation des auxiliaires par convertisseur Arno

— *Moteurs à collecteur à courant ondulé.* — Le courant monophasé, redressé par un pont de diodes, alimente les moteurs auxiliaires série à courant ondulé relevant de la même technique de construction que les moteurs de traction à courant ondulé.

b) *Chargeur de batterie.* — Sur les locomotives à groupe tournant la batterie peut être chargée par une génératrice auxiliaire entraînée par le groupe. Sur toutes les locomotives monophasées la charge est assurée très simplement par un pont redresseur avec inductance ou résistance tampon. En utilisant un pont à thyristors une régulation en fonction de l'état de charge est possible.

5.5. Locomotives modernes à courant monophasé

5.5.1. Locomotives de moyenne puissance. — Elles sont représentées par les BB 16500 et les BB 17000, deux séries à bogies monomoteurs à double rapport d'engrenages. Le changement de rapport est opéré à l'arrêt par système à basculeur. Quatre-vingt-quinze des locomotives BB 16500 comportent des redresseurs excitrons et sont équipées pour le freinage par récupération. Les autres engins de la série sont munis soit d'ignitrons, soit de diodes au silicium. Les BB 17000 représentent la version « monophasé » des locomotives bi-courants BB 25500. Elles sont équipées de diodes au silicium. Sur ces deux séries de locomotives le réglage de la tension est assuré par graduateur et le shuntage est obtenu au moyen de contacteurs à commande individuelle.

5.5.2. Locomotives de grande puissance. — Elles sont représentées par les BB 16000 et les BB 15000. Les BB 16000, à bogies bi-moteurs, sont dotées de redresseurs ignitrons. Le réglage de tension et le shuntage sont assurés comme sur les BB 16500 et 17000. Les BB 15000, à bogies monomoteurs, sont dotées de diodes et de thyristors (un pont totalement commandé et un pont semi-commandé en série pour chaque moteur). Le shuntage est assuré par des thyristors. Cet équipement totalement statique est placé sous la dépendance d'un régulateur de vitesse. Il permet le freinage par récupération, utilisé en situation normale, et un freinage rhéostatique de sécurité avec excitation assurée par batterie d'accumulateurs en cas d'absence de tension en ligne.

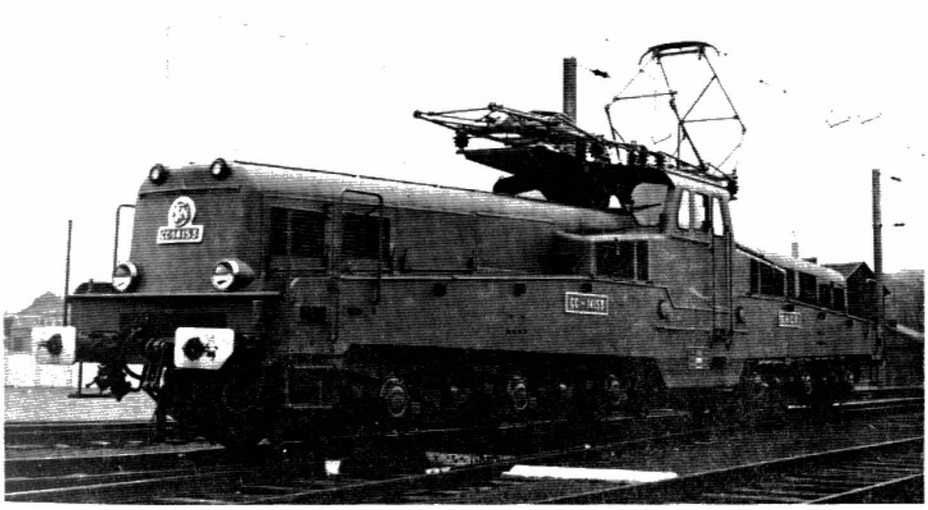
5.6. Locomotives à alimentation triphasée. —

L'électrification avec des lignes triphasées n'a connu de développement notable qu'en Italie essentiellement sous deux versions : 3-3,6 kV-$16\frac{2}{3}$ Hz et 10 kV-45-50 Hz. La seconde est totalement abandonnée depuis 1946 et la première est en voie de disparition au profit du courant continu (3 kV).

Les moteurs de traction étaient des moteurs asynchrones alimentés, dans la première version, directement par la caténaire et dans la seconde par l'intermédiaire d'un transformateur. Rustiques et robustes mais lents et encombrants, ils entraînaient les essieux par bielle triangulaire et bielle d'accouplement, soit directement dans le cas des moteurs à fréquence réduite, soit avec des engrenages intermédiaires. Quelques vitesses économiques pouvaient être obtenues par modification du nombre de pôles et couplage de deux moteurs en cascade, le rotor du premier alimentant le stator du second. Le passage progressif d'une vitesse économique à la suivante s'obtenait par élimination de résistances en série avec les bobinages rotoriques. Dans les pentes, les moteurs fonctionnant à l'hypersynchronisme, la stabilité de la vitesse était automatiquement assurée avec récupération d'énergie. Mais cette propriété intéressante n'a pas suffi à compenser le manque de souplesse du système triphasé et la complexité de sa ligne de contact.

5.7. Locomotives dites polycourants

5.7.1. Intérêt des locomotives polycourants. — L'électrification des réseaux ferrés des divers pays (V. § 2) ayant été réalisée suivant des systèmes différents sur une ligne internationale, il est presque de règle de rencontrer deux systèmes différents de part et d'autre d'une frontière.

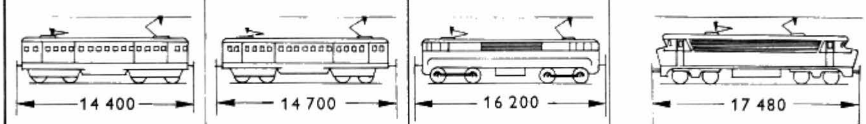


Locomotive CC 14100 à groupe monocontinu ; courant monophasé 25 kV, 50 Hz (*S.N.C.F.*)

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES LOCOMOTIVES A COURANT MONOPHASÉ 25 kV-50 Hz

	MOYENNE PUISSANCE		GRANDE PUISSANCE	
Série	BB-16500	BB-17000	BB-16000	BB-15000
Date de mise en service	1958	1965	1958	1971
Nombre d'engins existants ou prévus	294	105	61	15

Diagramme



	BB-16500 Régime « voyageurs »	BB-16500 Régime « marchandises »	BB-17000 Régime « voyageurs »	BB-17000 Régime « marchandises »	BB-16000	BB-15000 Champ maximal	BB-15000 Champ minimal
Régime continu — Puissance (kilowatts)	2 580		2 940		4 130	4 370	4 620
Régime continu — Vitesse (kilomètres par heure)	82	48	82	49	97	97,5	159
Régime continu — Effort (décanewtons)	11 100	18 850	12 500	20 900	14 900	15 800	10 300
Vitesse maximale (kilomètres par heure)	150	90	150	90	160	180	
Effort à vitesse maximale (décanewtons)	5 000	8 100	6 800	11 400	8 240	8 200	
Masse totale (tonnes)	74		78		84,5	84	

	BB-16500	BB-17000	BB-16000	BB-15000
Type de bogie	monomoteur	monomoteur	bi-moteurs	monomoteur
Nombre de rapports d'engrenages	2	2	1	
Type de redresseurs	Ignitrons Excitrons Silicium	Silicium	Ignitrons	Silicium (thyristors)

Schéma simplifié du circuit de traction

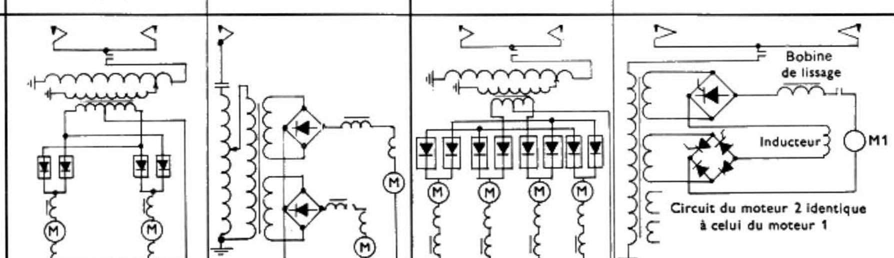
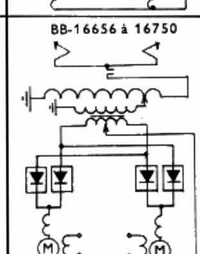
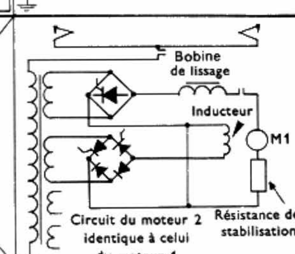


Schéma simplifié du circuit de freinage électrique





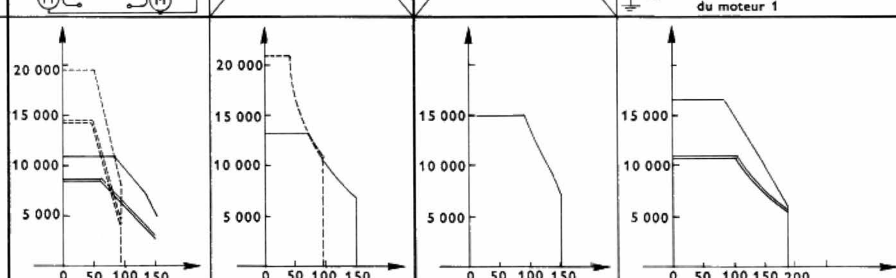
Courbe effort-vitesse au régime continu

en traction { ------ rapport P.V. / ____ rapport G.V.

en freinage { ===== rapport P.V. / ═══ rapport G.V.

F (décanewtons)

V (kilomètres par heure)



Par ailleurs, dans un même pays deux systèmes peuvent coexister, si l'évolution technique en a fait choisir un nouveau au cours du développement de l'électrification (cas de la France). L'écoulement du trafic entre deux lignes électrifiées avec deux systèmes de courants différents peut se concevoir de deux façons : soit au moyen de locomotives monocourants qui se relaient au point de jonction, soit au moyen d'engins polycourants capables des mêmes performances avec les deux catégories de courants.

Dans le premier cas la transition se fait dans une gare dite « bicourant » dont les caténaires « commutables » de certaines voies peuvent être alimentées avec l'un ou l'autre des courants de traction en présence. Une telle disposition présente des sujétions sérieuses pour le service de l'exploitation : elle implique l'arrêt de tous les trains aux points de jonction et, dans une gare importante, elle entraîne de lourdes complications dans la commande des sectionneurs de commutation et dans la signalisation qui doit être spécialement adaptée pour éviter les risques de fausse manœuvre. Au point de vue traction, le relais systématique des locomotives au point de jonction n'est pas favorable à une bonne utilisation de celles-ci.

Au contraire, dans le cas de locomotives polycourants, la transition peut se concevoir en pleine voie, les caténaires alimentées par des courants différents étant simplement séparées par une section neutre reliée à la terre comme le montre la figure IV-157. La locomotive polycourant enlève donc au service de l'exploitation la charge d'établir la liaison entre deux systèmes différents d'électrification. Les progrès réalisés dans l'allégement des parties mécaniques, de l'appareillage, des moteurs de traction et l'apparition des redresseurs au silicium ont permis de réaliser des locomotives polycourants répondant aux différents problèmes qui se posent sans que leur masse par essieu dépasse les limites admissibles pour la voie.

5.7.2. Catégories de locomotives polycourants. — En Europe les artères importantes électrifiées présentent quatre systèmes différents : tension continue 1,5 kV, tension continue 3 kV ; tension monophasée 15 kV-16 $\frac{2}{3}$ Hz et tension monophasée 25 kV-50 Hz.

Bien que d'autres combinaisons soient possibles, des raisons techniques et la répartition géographique des systèmes d'électrification ont conduit à concevoir les engins polycourants désignés ci-après :

Désignation des engins polycourants	Nature des tensions utilisables	
	Continue	Monophasée
Bi-fréquence		25 kV-50 Hz et 15 kV-16 $\frac{2}{3}$ Hz
Bi-tension	1,5 et 3 kV	
Bi-courant	1,5 kV	25 kV-50 Hz
Tri-courant	1,5 et 3 kV	25 kV-50 Hz
Quadri-courant	1,5 et 3 kV	25 kV-50 Hz et 15 kV-16 $\frac{2}{3}$ Hz

1° *Locomotives bi-fréquences* (25 kV-50 Hz et 15 kV-16 $\frac{2}{3}$ Hz). — Elles comportent des moteurs de traction à collecteur alimentés soit en courant monophasé, soit en courant redressé. Le circuit magnétique du transformateur principal doit être judicieusement dimensionné pour limiter à une valeur convenable l'induction magnétique dans le fer à la fréquence 16 $\frac{2}{3}$ Hz. En général, il n'est pas effectué de commutation sur le secondaire-traction ; la tension secondaire à vide est donc réduite pour cette fréquence dans le rapport des tensions primaires, soit $\frac{15}{25} = \frac{3}{5}$. La puissance de la locomotive n'est pas toutefois réduite d'autant, car les

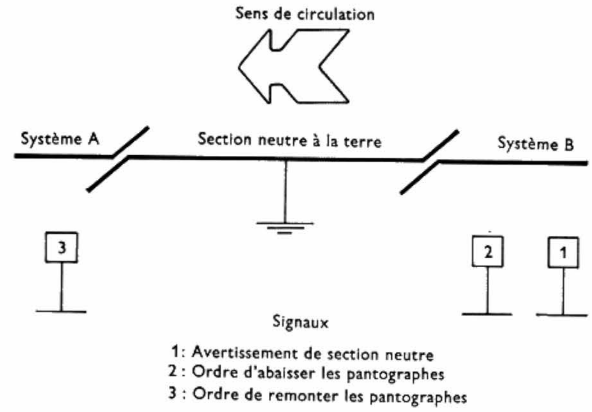


Fig. IV-157 — Raccordement en pleine voie de deux systèmes de traction alimentés par des courants différents

chutes inductives sont moindres à la fréquence de 16 $\frac{2}{3}$ Hz qu'à celle de 50 Hz.

Comme les moteurs de traction, les groupes auxiliaires sont alimentés soit en courant monophasé, soit en courant redressé. Dans ce dernier cas, un changement de prise sur l'enroulement du transformateur permet d'obtenir la même tension redressée avec les deux systèmes d'alimentation de la caténaire. Cette disposition n'est pas nécessaire dans le cas de moteurs monophasés à collecteur en raison de la différence des chutes de tension inductives déjà mentionnées.

À noter que les moteurs de ventilateurs peuvent auss être alimentés en courant ondulé à partir d'un pont redresseur à diodes, connecté au secondaire d'un transformateur de courant dont le primaire est traversé par le courant de traction. Ce procédé réalise l'asservissement entre les ventilateurs et le courant absorbé par les moteurs.

2° *Locomotives bi-tensions* (tensions continues 1,5 et 3 kV). — Les locomotives à courant continu comportent nécessairement des moteurs 1,5 kV (V. § 2.1.3). La réalisation d'engins bi-tensions ne pose pas de problème majeur : elle se ramène essentiellement à l'utilisation de couplages différents tant pour les moteurs de traction que pour ceux des auxiliaires. Si la locomotive ne comporte qu'un seul compresseur, celui-ci est entraîné soit par un moteur à deux enroulements et deux collecteurs couplés en série ou en parallèle, soit par un moteur à 1,5 kV alimenté sous 3 kV à travers une résistance pour provoquer une chute de tension.

3° *Locomotives bi-courants* (25 kV/50 Hz en alternatif et 1,5 kV en continu). — Sur la plupart de ces locomotives, les moteurs de traction sont alimentés soit sous caténaire à courant continu, au travers d'un rhéostat pour le démarrage, soit sous caténaire à courant monophasé, par l'intermédiaire d'un transformateur et de redresseurs (fig. IV-158).

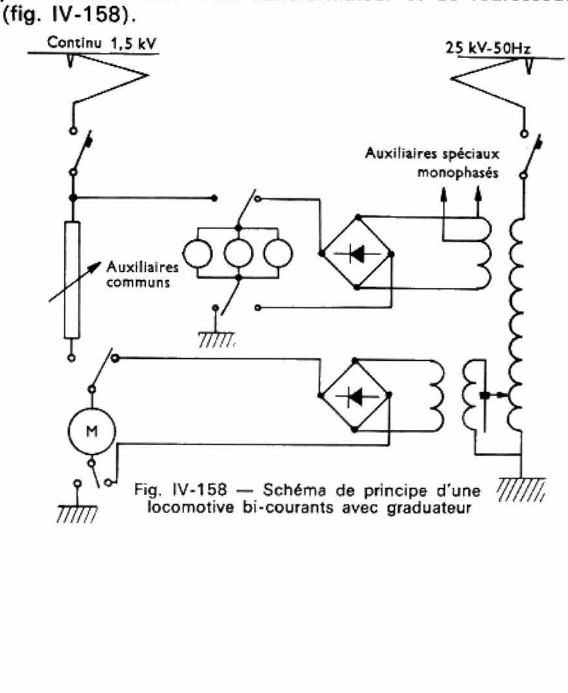


Fig. IV-158 — Schéma de principe d'une locomotive bi-courants avec graduateur

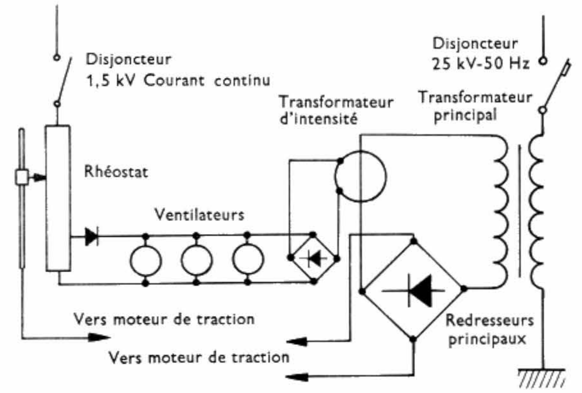


Fig. IV-159 — Schéma d'alimentation de ventilateurs utilisés sous courant continu

En courant continu plusieurs couplages des moteurs sont utilisés; en monophasé le réglage de tension est réalisé soit par graduateur, soit par thyristors. Il est possible aussi de constituer un équipement commutable à thyristors et diodes utilisable tantôt en hacheur, tantôt en redresseur semi-commandé.

Les auxiliaires équipant les deux systèmes, comme les compresseurs et ventilateurs des moteurs de traction, sont commutés pour être alimentés par l'intermédiaire d'un pont redresseur depuis la caténaire à courant continu ou depuis une prise du transformateur. Si les mêmes groupes sont utilisés pour ventiler le rhéostat et les réfrigérants du transformateur ou les redresseurs, selon la nature de la tension caténaire, ils sont branchés aux bornes d'une portion du rhéostat ou à celles d'un transformateur de courant : des diodes suffisent alors pour les alimenter d'une manière ou de l'autre (fig. IV-159).

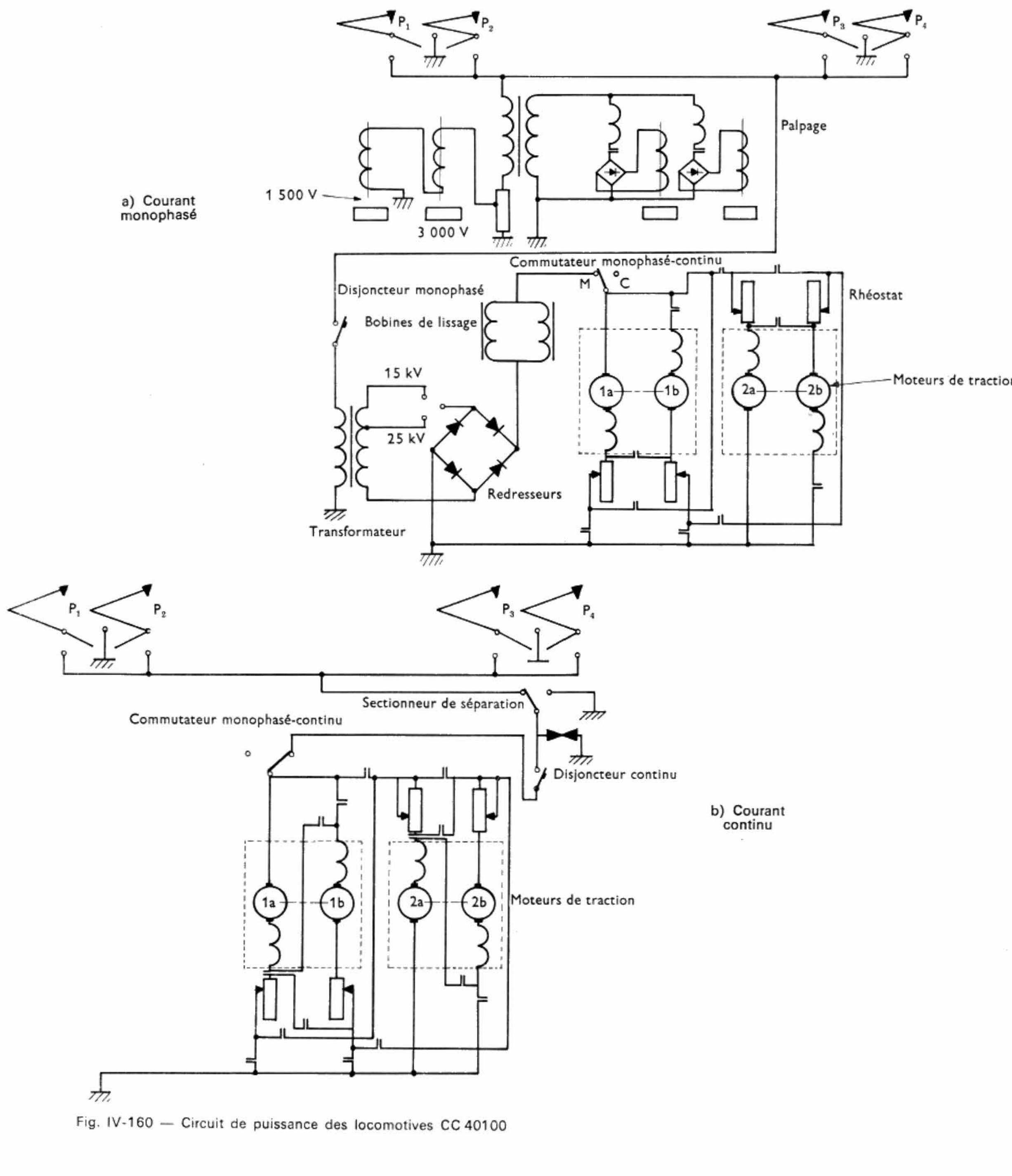


Fig. IV-160 — Circuit de puissance des locomotives CC 40100

4° *Locomotives tri-courants et quadri-courants* (25 kV-50 Hz et 15 kV-$16\frac{2}{3}$ Hz en alternatif ; 1,5 et 3 kV en continu). — La plupart de ces locomotives ont été conçues comme des engins à courant continu bi-tensions (1,5 et 3 kV) emportant en quelque sorte leur propre sous-station pour fonctionner sous tension monophasée. L'équipement à courant continu est à rhéostat. L'ensemble transformateur à rapport fixe et redresseurs, qui lui est ajouté, est monofréquence (25 kV-50 Hz) pour les locomotives tri-courants, et bi-fréquence (25 kV-50 Hz - 15 kV-$16\frac{2}{3}$ Hz) pour les locomotives quadri-courants (fig. IV-160). Sur les locomotives quadri-courants (en continu 1,5 et 3 kV - 25 kV - 50 Hz - 15 kV/$16\frac{2}{3}$ Hz en alternatif) circulant sur l'ensemble des lignes européennes, il existe quatre pantographes différents (fig. IV-161) montés en parallèle. Chacun d'eux est mis en service séparément, suivant la position du « sélecteur d'administration ».

5.7.3. Locomotives polycourants modernes. — La figure IV-162 reprend, à titre d'exemple, les caractéristiques essentielles des locomotives polycourants modernes de la S.N.C.F. À noter qu'il n'existe pas d'engins bi-tensions : ceux-ci se rencontrent essentiellement sous forme de rames automotrices desservant la Belgique et les Pays-Bas, électrifiés en courant continu (respectivement 3 et 1,5 kV).

Certaines locomotives bi-courants de la figure IV-162 (page suivante) ont aussi été construites en version monocourant avec les mêmes organes mécaniques et la partie de l'équipement électrique correspondant à la nature du courant considéré.

— Les CC 21000 correspondent en version continu aux CC 6500 mentionnées sur la figure IV-127.

— Les BB 25500 correspondent en version continu aux BB 8500 et en version monophasée aux BB 17000 mentionnées respectivement aux paragraphes 5.3 et 5.5.

— Par ailleurs, les locomotives bi-fréquences BB 20200 découlent également des BB 25500 dont elles possèdent les mêmes parties mécaniques et les mêmes moteurs de traction.

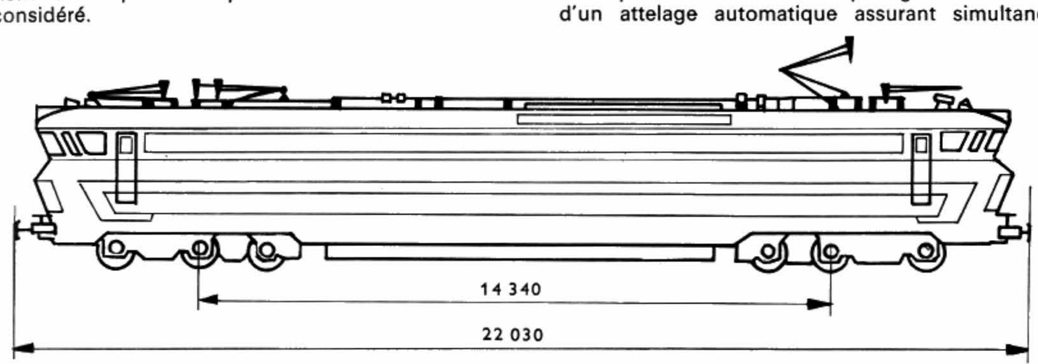
Une telle unification est génératrice d'économie tant à la construction que pour l'entretien du matériel.

6. ÉLÉMENTS AUTOMOTEURS

6.1. Généralités. — Les éléments automoteurs sont constitués par des automotrices accouplées entre elles ou par une ou plusieurs automotrices accouplées à des remorques éventuellement munies de cabine de conduite, pour réaliser un ensemble réversible, c'est-à-dire pouvant être conduit de l'une ou de l'autre de ses extrémités suivant le sens de circulation.

Les automotrices électriques comportent une caisse aménagée pour recevoir des voyageurs. Celle-ci repose sur des bogies dont l'un au moins est moteur. Une cabine de conduite est disposée à l'une des extrémités ou aux deux extrémités si l'automotrice est appelée à circuler seule. L'équipement électrique de traction est installé sous la caisse, sur la toiture et dans certains cas dans un compartiment de dimensions réduites.

Les véhicules, moteurs ou remorqués, composant un élément automoteur, constituent une unité indéformable en exploitation normale. Les éléments automoteurs sont accouplables en unités multiples généralement au moyen d'un attelage automatique assurant simultanément les



S.N.C.F.-C.F.L. F.S.	S.N.C.F.-S.N.C.B C.F.L.-N.S.	Administration	D.B.-Ö.B.B.	C.F.F.
25 kV ~ 3 kV =	1,5 kV = 3 kV =	Courant	15 kV ~	15 kV ~
Unipalette	Bipalette	Archet	Unipalette	Unipalette
1 450	1 950	Largeur (millimètres)	1 950	1 320

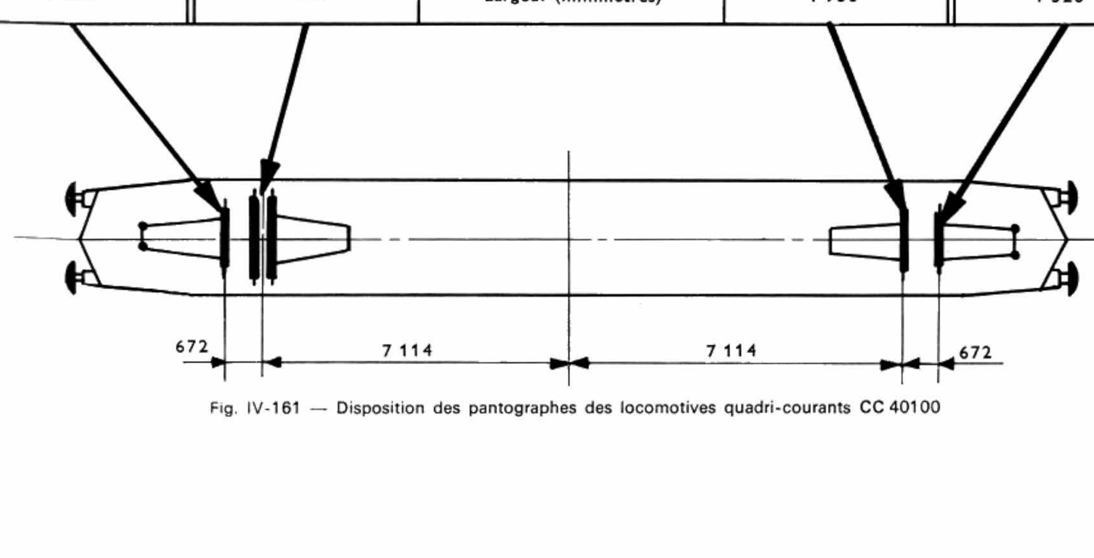


Fig. IV-161 — Disposition des pantographes des locomotives quadri-courants CC 40100

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES LOCOMOTIVES POLY-COURANT

Bi-fréquence-25 kV-50 Hz et 15 kV-16,66 Hz

	Moyenne puissance				Grande puissance			
Série	BB-20200				BB-20101 et 20102		BB-20103 et 20104	
Date de mise en service	1969-1970				1958		1958	
Nombre d'engins existants ou prévus	13				2		2	
	Sous 25 kV		Sous 15 kV		Sous 25 kV	Sous 15 kV	Sous 25 kV	Sous 15 kV
	Rapport P.V.	Rapport G.V.	Rapport P.V.	Rapport G.V.				
Régime continu — Puissance (kilowatts)	2 940		1 660		3 140	3 000	3 590	2 880
Régime continu — Vitesse (kilomètres par heure)	49	82	28	46.5	95	93	97	77,5
Régime continu — Effort (décanewtons)	20 900	12 500	20 900	12 500	11 600	11 300	13 050	13 050
Vitesse maximale (kilomètres par heure)	90	150	90	150	160		160	
Effort à vitesse maximale (décanewtons)	11 000	6 600	4 500	2 700	8 000	3 500	5 500	3 050
Masse totale (tonnes)	79		79		84		81	
Type de bogie	Monomoteur				Bimoteur		Monomoteur	
Nombre de rapports d'engrenages	2				1		1	
Type de redresseurs	Silicium						Silicium	

Bi-courant-25 kV-50 Hz et 1,5 kV continu

	Moyenne puissance		Grande puissance							
Série	BB-25500		BB-25100 / BB-25150		BB-25200		CC-21000			
Date de mise en service	1964		1964	1967	1965		1968			
Nombre d'engins existants ou prévus	87		25	20	46		2			
	Rapport P.V.	Rapport G.V.	Sous 25 kV	Sous 1,5 kV	Sous 25 kV	Sous 1,5 kV	Rapport P.V.		Rapport G.V.	
							Champ maximal	Champ minimal	Champ maximal	Champ minimal
Régime continu — Puissance (kilowatts)	2 940		4 130	3 400	4 130	3 400	5 520	5 900	5 520	5 900
Régime continu — Vitesse (kilomètres par heure)	49	82	83,5	57	99,5	68	62	100	135	220
Régime continu — Effort (décanewtons)	20 900	12 500	17 350	20 800	14 500	17 450	31 400	20 800	14 400	9 420
Vitesse maximale (kilomètres par heure)	90	150	130		160		100		220	
Effort à vitesse maximale (décanewtons)	11 400	6 800	10 100	8 000	7 850	6 400	20 800		9 420	
Masse totale (tonnes)	76		83		83		122			
Type de bogie	Monomoteur		Bimoteur				Monomoteur			
Nombre de rapports d'engrenages	2		1				2			
Type de redresseurs	Silicium		Silicium				Silicium (thyristors)			

Tri-courant-25-3-1,5 kV — Quadri-courant-25-15-3-1,5 kV

	Tri-courant-25-3-1,5 kV		Quadri-courant-25-15-3-1,5 kV			
	Moyenne puissance		Grande puissance			
Série	BB-30000		CC-40100			
Date de mise en service	1962		1964			
Nombre d'engins existants ou prévus	2		10			
	Rapport P.V.	Rapport G.V.	CC-40101 à 40104		CC-40105 à 40110	
			Rapport P.V.	Rapport G.V.	Rapport P.V.	Rapport G.V.
Régime continu — Puissance (kilowatts)	2 135		3 710		4 480	
Régime continu — Vitesse (kilomètres par heure)	49,5	74	115	160,5	123,5	154
Régime continu — Effort (décanewtons)	15 100	10 100	11 400	8 150	12 850	10 300
Vitesse maximale (kilomètres par heure)	100	150	160	240	180	220
Effort à vitesse maximale (décanewtons)	5 880	3 920	8 300	5 700	8 900	7 300
Masse totale (tonnes)	69		109			
Type de bogie	Monomoteur		Monomoteur			
Nombre de rapports d'engrenages	2		2			
Type de redresseurs	Silicium		Silicium			

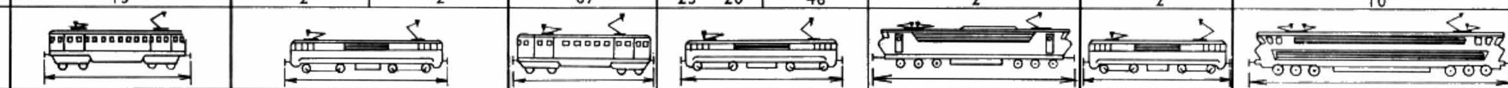


Schéma simplifié du circuit de traction

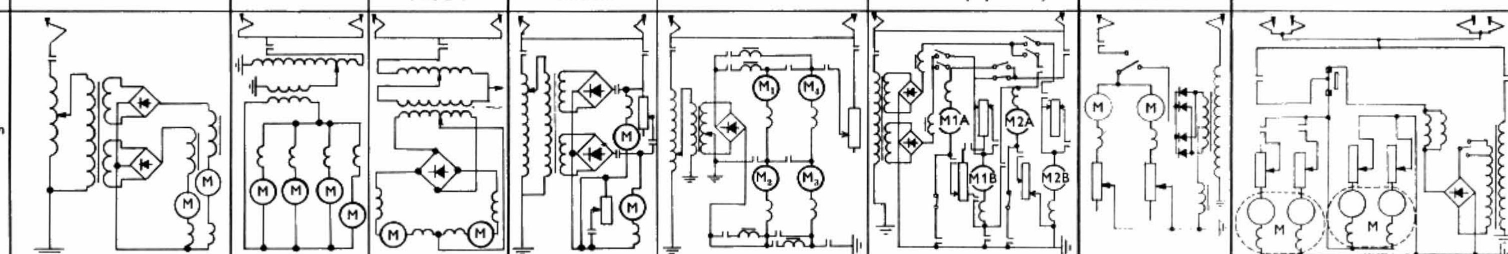
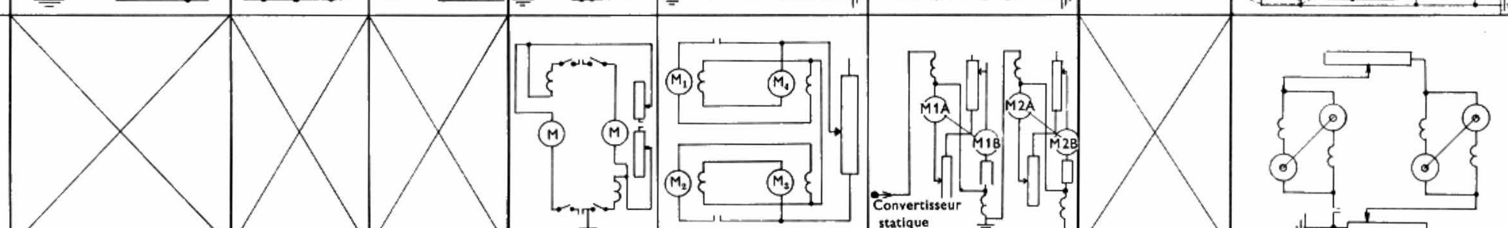


Schéma simplifié du circuit de freinage électrique



Courbe effort-vitesse au régime continu
en traction: ---- Rapport P.V.; —— Rapport G.V.
en freinage: ==== Rapport P.V.; ▬▬ Rapport G.V.
F (décanewtons) V (kilomètres par heure)

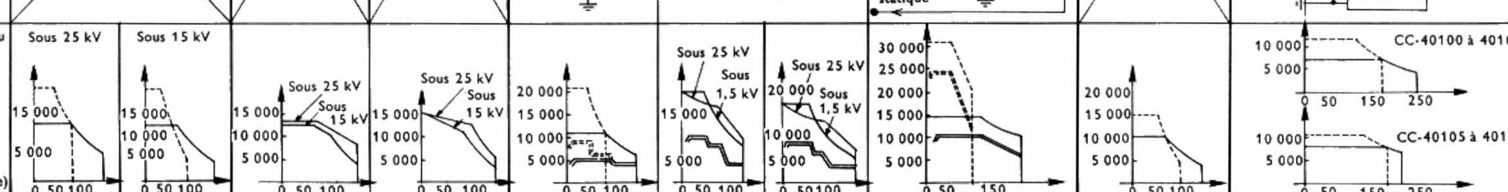
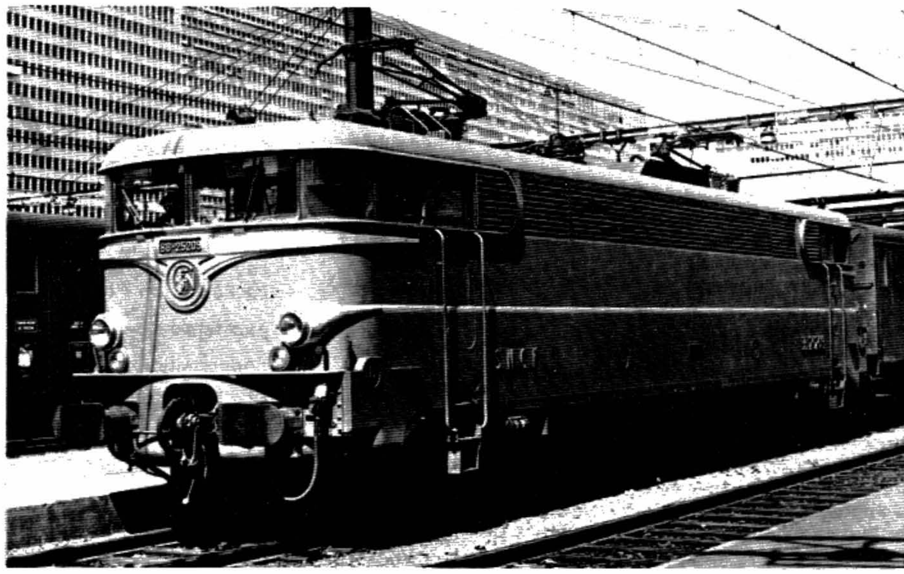
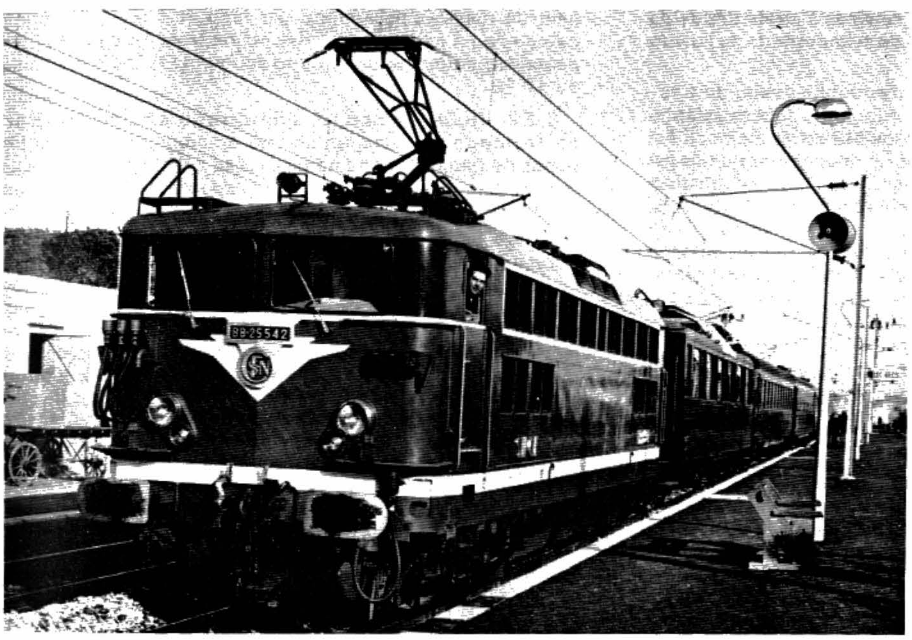


Fig. IV-162

Locomotive type BB 25200, à bogies bimoteurs à rapport unique et à transmission à cardans (cf. BB 9003 et 9004) ; bicourant :
— 25 kV-50 Hz
— 1,5 kV (continu)
(*S.N.C.F.*)





Locomotive type BB 25500, à bogies monomoteurs à deux rapports ;
bi-courant :
— 25 kV-50 Hz
— 1,5 kV
(*S.N.C.F.*)

Locomotive type CC 40100, à bogies monomoteurs à deux rapports ; quadricourant :
— 25 kV-50 Hz
— 15 kV-16 $\frac{2}{3}$ Hz monophasé
— 1,5 kV continu
— 3 kV continu
(*La Vie du Rail*)



liaisons mécaniques, pneumatiques et électriques. L'utilisation en unités multiples consiste à commander, à partir de la cabine de conduite placée en tête dans le sens de la marche, les équipements de traction des différentes automotrices incorporées dans le convoi (on emploie des circuits électriques appropriés). Une telle formule permet, d'une part, par variation du nombre d'éléments accouplés, d'adapter la composition des convois en fonction de l'affluence des voyageurs et, d'autre part, d'assurer « l'éclatement rapide », dans les gares de bifurcation, des éléments arrivés ensemble mais se dirigeant dans des directions différentes.

Par ailleurs, la répartition de l'effort moteur sur plusieurs véhicules, voire sur la totalité de ceux-ci, présente les avantages suivants :

— masse adhérente importante autorisant au démarrage un effort de traction global important et, par conséquent, des performances brillantes en matière d'accélération ;

— possibilité de limiter la charge unitaire des essieux moteurs, ce qui est favorable à la réalisation de très grandes vitesses puisqu'il en résulte une réduction des efforts dynamiques sur la voie ;

— possibilité d'utiliser efficacement le freinage électrique particulièrement intéressant, d'une part aux grandes vitesses, car il permet d'éviter les contraintes thermiques provoquées dans les roues par le frottement des sabots de frein, d'autre part dans le cas des services à arrêts fréquents (banlieue) où il apporte une réduction importante de l'usure des organes de freinage.

En contrepartie, la multiplicité des équipements de traction, dont le prix n'est pas proportionnel à leur puissance unitaire, augmente le coût des éléments automoteurs. Il est cependant possible d'atténuer cet inconvénient en utilisant un seul équipement pour alimenter les moteurs de traction de deux véhicules voisins.

6.2. Domaine d'utilisation des éléments automoteurs. — Les éléments automoteurs offrent une grande souplesse d'exploitation. Ils conviennent parfaitement pour assurer les différentes catégories de trafic voyageurs ci-après :

1° *Relations fréquentes à très grande vitesse.* — Il s'agit alors de rames automotrices avec aménagement intérieur soigné offrant un grand confort (climatisation, bar, service de restauration, etc.) permettant au voyageur d'accomplir sans fatigue et agréablement des parcours de jour pouvant atteindre jusqu'à 500 ou 600 km. Un exemple typique d'une telle application est donné par les chemins de fer nationaux du Japon qui exploitent depuis 1964 la nouvelle ligne Tokyo-Osaka (515 km) électrifiée en courant monophasé 25 kV avec des rames automotrices indéformables de douze véhicules circulant à la vitesse maximale de 210 km/h. De même la ligne du San-Yo de Osaka à Okayama puis jusqu'à l'île de Kyushu sera également exploitée avec des rames automotrices circulant à la vitesse maximale de 250 km/h.

À l'actif des rames réversibles indéformables pour très grande vitesse, il convient de retenir la possibilité de donner aux véhicules d'extrémités une forme aérodynamique spécialement étudiée pour diminuer la résistance de l'air.

2° *Relations fréquentes entre villes importantes situées à courte ou à moyenne distance.* — Ce mode d'exploitation est assez répandu dans certains pays européens tels que : Belgique, Pays-Bas, Suisse, etc.

3° *Service de banlieue des grandes agglomérations.* L'emploi de rames automotrices est de règle quasi générale sur les lignes de banlieue électrifiées.

4° *Lignes de montagne à profil difficile.*

6.3. Diagrammes des éléments automoteurs. — Les diagrammes des éléments automoteurs, c'est-à-dire la répartition entre automotrices et remorques dans un même élément, dépendent de la nature du service assuré et des performances recherchées. Les rames à très grande vitesse sont en général à adhérence totale, tous les essieux étant moteurs, ce qui permet de bénéficier des avantages du freinage électrique. Les éléments assurant des relations entre villes à courte ou moyenne distance comportent souvent chacun une automotrice accouplée à une remorque avec cabine de conduite. Les éléments de banlieue peuvent être composés de différentes façons suivant l'importance attachée aux performances d'accélération au démarrage. Il existe des éléments constitués uniquement d'automotrices (adhérence totale) et des éléments constitués d'une automotrice accouplée à une, deux ou trois remorques.

6.4. Cas particulier du service de banlieue

6.4.1. Masse du matériel. — Dans un service à arrêts fréquents la masse propre du convoi revêt une importance capitale puisque, d'une part, à égalité d'effort de traction F l'accélération γ est d'autant plus grande que la masse M est plus faible $\left(\gamma = \frac{F}{M}\right)$ et, d'autre part, les dépenses d'énergie pour atteindre une certaine vitesse V sont proportionnelles à la masse $\left(W = \frac{1}{2}MV^2\right)$. Il est donc nécessaire de réaliser un matériel aussi léger que possible mais néanmoins suffisamment résistant pour satisfaire aux essais mécaniques prévus par les normes en vigueur. C'est dans ce but que la S.N.C.F. a recours, pour la construction du matériel moderne de banlieue, à l'acier inoxydable, couramment appelé 18-8 en raison de sa composition (Cr 18 %, Ni 8 %) qui présente des qualités mécaniques remarquables. Le gain de masse ainsi obtenu par rapport à la construction habituelle en acier au carbone est de trois à quatre tonnes par caisse correspondant à une économie d'énergie voisine de 10 %.

6.4.2. Accélération au démarrage et décélération au freinage. — Dans un service omnibus de banlieue les temps de parcours entre gares situées à de faibles distances sont fortement influencés par les valeurs de l'accélération au démarrage et de la décélération au freinage.

1° *Accélération au démarrage.* — Les courbes effort-vitesse des automotrices ont un aspect analogue à celles des locomotives mais les moteurs de traction atteignent la pleine tension, puis la réduction du champ inducteur, à une vitesse relativement faible, au-delà de laquelle l'effort de traction décroît quand la vitesse augmente. Ainsi dans le cas de la figure IV-163, l'effort moyen au démarrage est constant entre 0 et 45 km/h puis décroît ensuite jusqu'à la vitesse maximale de 120 km/h.

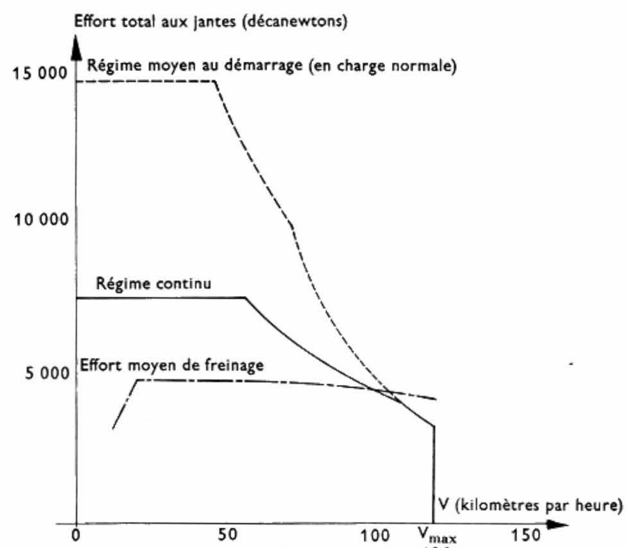


Fig. IV-163 — Éléments automoteurs de banlieue 1,5 kV, courant continu, type 5300 : caractéristiques effort-vitesse en traction et en freinage électrique

L'accélération est donc maximale jusqu'à 45 km/h puis diminue ensuite. Pour ne pas nuire au confort des voyageurs, il est recommandé de se limiter à une accélération de 1,2 m/s². Il est toutefois possible de dépasser quelque peu cette valeur sous réserve de réaliser un équipement de

démarrage à réglage continu de l'effort tel que la variation d'accélération s'opère de façon linéaire ou autrement dit que le terme $\frac{d\gamma}{dt}$ soit constant.

L'accélération pendant le démarrage n'étant pas constante, il est possible de définir différentes valeurs d'accélérations constantes :

— Accélération γ_1 qui donnerait le même temps de démarrage :

$$\gamma_1 = \frac{V}{T}$$

V étant la vitesse atteinte en fin de démarrage et T le temps de démarrage.

— Accélération γ_2 qui conduirait au même espace parcouru pendant la période de démarrage.

Soit E l'espace parcouru pendant le démarrage. Les relations du mouvement uniformément accéléré sans vitesse initiale s'écrivent :

$$V = \gamma_2 t$$

$$E = \frac{1}{2}\gamma_2 t^2$$

D'où :

$$\gamma_2 = \frac{V^2}{2E}$$

— Accélération γ_3 qui permettrait de réaliser le même horaire. Soit T le temps nécessaire au démarrage, V la vitesse atteinte en fin de démarrage et t le temps perdu pendant le démarrage par rapport à la marche sans arrêt à vitesse constante.

$$t = T - \frac{E}{V} \qquad (1)$$

$$t = \frac{V}{\gamma_3} - \frac{E}{V}$$

Dans le cas d'un mouvement uniformément accéléré sans vitesse initiale :

$$E = \frac{V^2}{2\gamma_3}$$

donc :

$$t = \frac{V}{\gamma_3} - \frac{V^2}{2\gamma_3 . V} = \frac{V}{2\gamma_3} \qquad (2)$$

et en égalant (1) et (2) il vient :

$$T - \frac{E}{V} = \frac{V}{2\gamma_3}$$

d'où :

$$\gamma_3 = \frac{V}{2\left(T - \frac{E}{V}\right)}$$

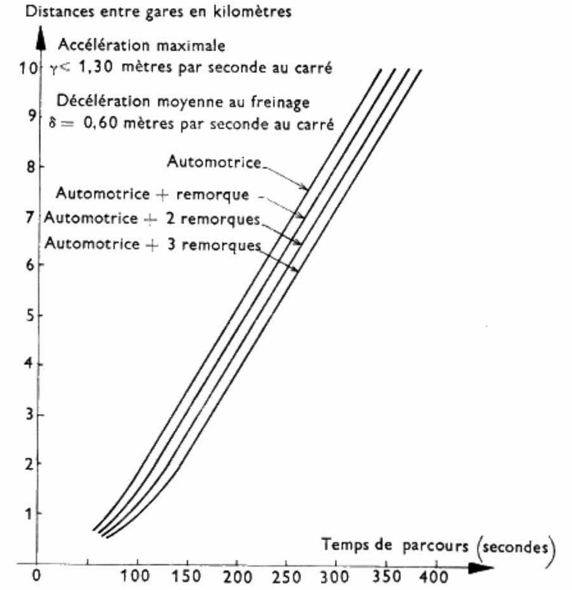


Fig. IV-164 — Performances en palier de rames de banlieue pour différentes compositions de rames

2° *Décélération au freinage.* — Les valeurs limites de décélération admissibles en freinage sont en principe les mêmes que celles indiquées pour l'accélération au démarrage. Toutefois, dans le cas du freinage pneumatique, la décélération est souvent comprise entre 0,75 et 1 m/s² afin que la puissance de freinage dissipée ne conduise pas à un échauffement excessif des roues. Avec le freinage électrique et avec du matériel à adhérence totale il est possible d'atteindre des décélérations de 1,2 à 1,3 m/s².

En règle générale la décélération ne reste pas constante pendant toute la durée du freinage, mais il est possible de considérer des décélérations constantes dans les conditions déjà indiquées pour les accélérations au démarrage.

3° *Influence sur les horaires.* — Le graphique de la figure IV-164 montre comment varie en fonction de leur distance le temps de parcours entre deux gares suivant que le service est assuré par : une automotrice ; une automotrice accouplée à une remorque, à deux remorques, à trois remorques. L'automotrice seule est capable d'une accélération au démarrage entre 0 et 45 km/h de plus de 2 m/s² ;



Fig. IV-165

Caisse en acier inoxydable d'éléments automoteurs de service de banlieue (*S.N.C.F.*)

néanmoins le graphique a été tracé dans l'hypothèse d'une accélération maximale de 1,3 m/s².

En définitive, le choix du diagramme à retenir pour un service déterminé résulte d'un compromis entre les prix d'acquisition du matériel et les performances désirées.

6.4.3. Vitesse maximale. — Le service de banlieue comprend des trains omnibus desservant des gares dont la distance moyenne est souvent voisine de 2 à 3 km et des trains directs parcourant de 10 à 40 km sans arrêt. Pour que la vitesse commerciale de cette deuxième catégorie de trains soit aussi grande que possible, les matériels modernes de banlieue peuvent atteindre une vitesse maximale de 120 km/h alors que le matériel ancien ne dépassait pas 80 ou 90 km/h.

6.4.4. Accès dans les voitures. — En général, le temps de stationnement dans les gares de banlieue autres que les gares très importantes est fixé à 30 s pendant lesquelles doit se faire l'évolution des voyageurs. Cela montre l'intérêt des accès faciles dans les voitures. Il est plus économique de gagner par ce moyen 5 ou 10 s sur un stationnement plutôt que d'accroître considérablement la puissance massique pour essayer de gagner le même temps sur le parcours entre deux gares à faible distance. Aussi le matériel de banlieue fait-il l'objet de dispositions particulières concernant notamment : le nombre de portes d'accès par caisse, la largeur du passage offert par celles-ci, la hauteur du plancher, les conditions d'emmarchement par rapport aux quais.

6.5. Partie mécanique

6.5.1. Caisse. — Comme déjà indiqué, les éléments automoteurs modernes comportent souvent une part importante d'acier inoxydable 18-8. Après écrouissage par laminage à froid, ce métal présente une charge de rupture de 105 hbar et une limite d'élasticité de 85 hbar. Ainsi la caisse des automotrices de banlieue (V. fig. IV-165) est construite avec ce matériau sous la forme de tôles de faible épaisseur (0,5 à 2 mm), planes ou ondulées pour en augmenter la rigidité, et soudées entre elles par résistance (fig. IV-166). Seuls les longerons et les extrémités du châssis sont en acier au carbone soudé à l'arc. Sur les remorques, les longerons sont eux-mêmes en acier « inox » de 3 mm, et seuls les caissonnements d'extrémité des châssis sont en acier ordinaire.

Les alliages légers ne sont guère utilisés à la S.N.C.F. que pour des garnitures diverses, mais des études sont en cours pour construire des caisses complètes en alliage aluminium-zinc (4,5 %) -magnésium (1 %). Ce matériau, le « duralumin » AZ 5 G a une résistance mécanique voisine de celle de l'acier doux (35 hbar) et se soude aisément sous atmosphère neutre. De telles constructions existent à l'étranger, surtout en Allemagne et en Suisse.

L'attelage entre deux caisses d'un même élément est réalisé par une barre élastique à double effet (traction et compression), fixée à chaque caisse par l'intermédiaire d'une articulation à cardans. En outre, des câblots et des demi-accouplements assurent la continuité des circuits électriques et pneumatiques. L'attelage entre deux éléments est réalisé par un autocoupleur Dellner-Scharfenberg fixé sur l'avant de l'automotrice et sur l'extrémité de la dernière remorque (fig. IV-167). Ce dispositif assure :

— la liaison choc et traction par un système de verrou et manille (fig. IV-168) ;

— la continuité des canalisations pneumatiques par des joints élastiques et des clapets ;

— la continuité des circuits électriques basse tension par un coupleur à contacts élastiques fixé au-dessus de l'attelage.

Des tampons de protection disposés de part et d'autre ne sont pas normalement en contact ; ils permettent éventuellement la remorque de l'élément par un engin moteur muni de l'attelage ordinaire.

L'aménagement intérieur des automotrices et des remorques est semblable à celui des voitures et comporte, pour une large part, des matériaux plastiques stratifiés d'un entretien facile. Dans les éléments de banlieue cet aména-

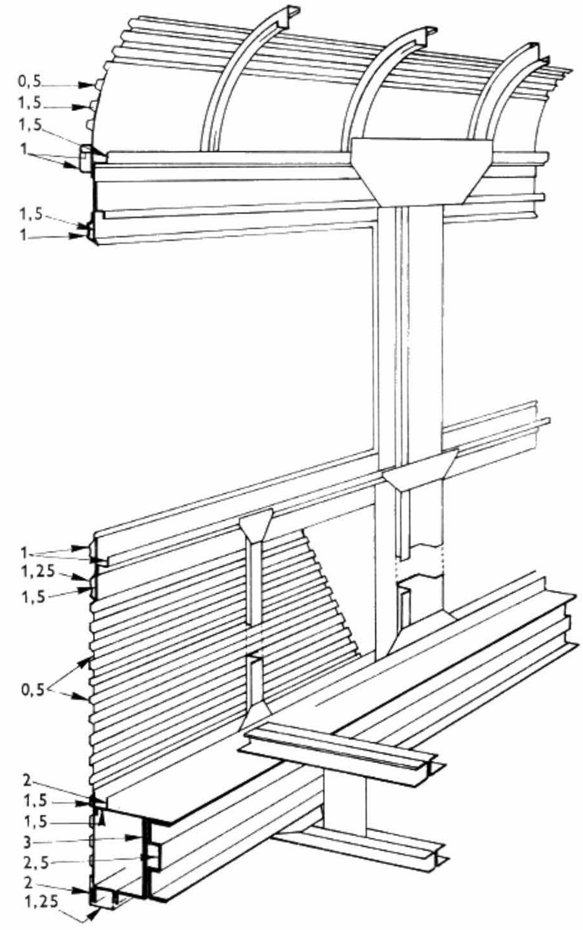


Fig. IV-166 — Ossature de caisse en acier inoxydable 18-8 ; épaisseur des éléments constitutifs (en millimètres)

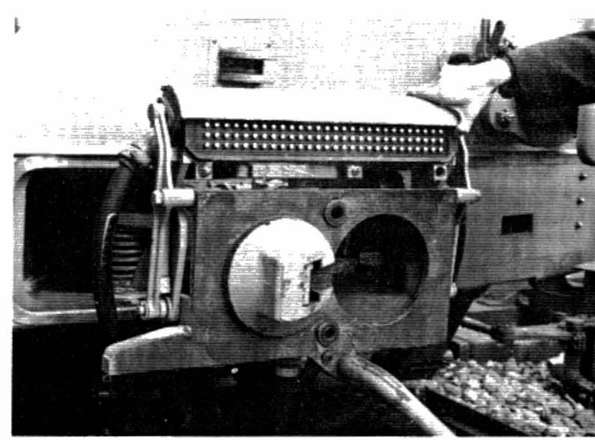


Fig. IV-167 — Autocoupleur Dellner-Scharfenberg (*S.N.C.F.*)

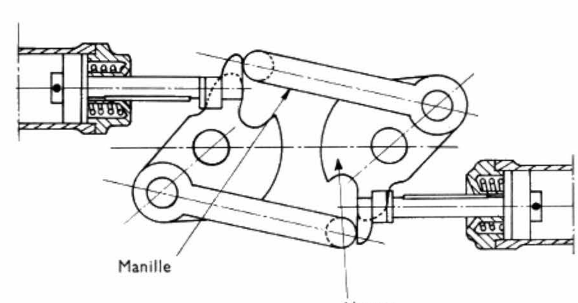


Fig. IV-168 — Autocoupleur Dellner-Scharfenberg : liaison choc et traction



Fig. IV-169 — Élément automoteur de banlieue : aménagement intérieur (2e classe)

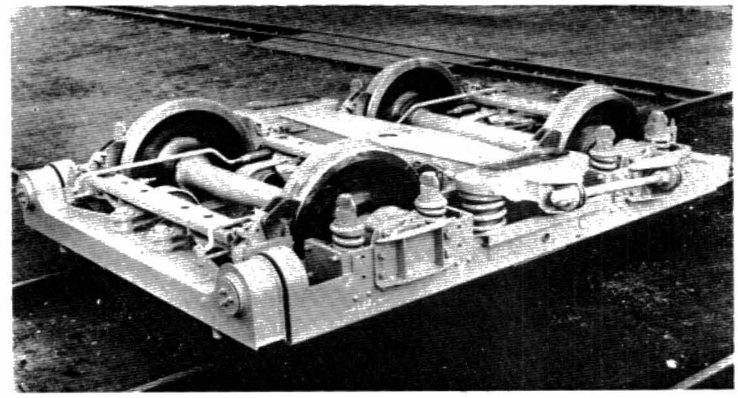


Fig. IV-171 — Remorque d'élément automoteur de banlieue : bogie porteur surbaissé

gement est relativement simple (fig. IV-169) ; dans les éléments de grand parcours, l'intérieur est soigné et confortable. L'appareillage des cabines de conduite est semblable à celui des locomotives ; toutefois les cabines elles-mêmes sont souvent de dimensions réduites, surtout dans les éléments de banlieue. Il faut noter aussi que, dans le matériel moderne de banlieue, la fermeture automatique des portes d'accès est commandée par le chef de train au moyen d'interrupteurs disposés près des portes extrêmes de chaque véhicule.

6.5.2. Bogies. — D'une manière générale, les bogies des automotrices sont semblables à ceux des locomotives et ils ont évolué de la même façon.

Les bogies d'automotrices sont généralement bimoteurs car leur faible hauteur permet de les placer sans difficultés sous des compartiments voyageurs. À l'origine, pour des vitesses modérées, les moteurs étaient suspendus par le nez ; pour des vitesses plus grandes, le souci de soustraire ces organes à des contraintes mécaniques dangereuses, a conduit à les suspendre entièrement. C'est la disposition adoptée pour les récentes automotrices à courant continu (1,5 kV) de la S.N.C.F. Le bogie est alors essentiellement constitué par deux longerons reliés à leurs extrémités par deux traverses munies d'articulations élastiques. Ces longerons reposent sur chaque boîte d'essieu par l'intermédiaire d'un bloc de caoutchouc en forme de croissant et supportent une traverse centrale par des ressorts mixtes acier-caoutchouc, à flexibilité variable, qui constituent la « suspension primaire » complétée par des amortisseurs à friction. Les moteurs sont boulonnés directement sur la traverse, chacun supportant par l'intermédiaire d'un roulement à rouleaux l'arbre creux de l'essieu correspondant. La transmission du mouvement est unilatérale, chaque pignon entraînant directement la couronne de l'arbre creux, lequel est relié aux roues par un entraînement à cardans.

Les automotrices à courant monophasé de la S.N.C.F. ne comportent qu'un seul bogie moteur du type monomoteur qui dérive directement de celui des locomotives BB 9400 (fig. IV-170). En raison de son volume, le moteur de traction pénètre dans la caisse dans un compartiment qui reçoit également le gros appareillage électrique et notamment le transformateur et son graduateur. Le deuxième bogie, simplement porteur, est du type surbaissé et équipe toutes les remorques des éléments automoteurs modernes (fig. IV-171).

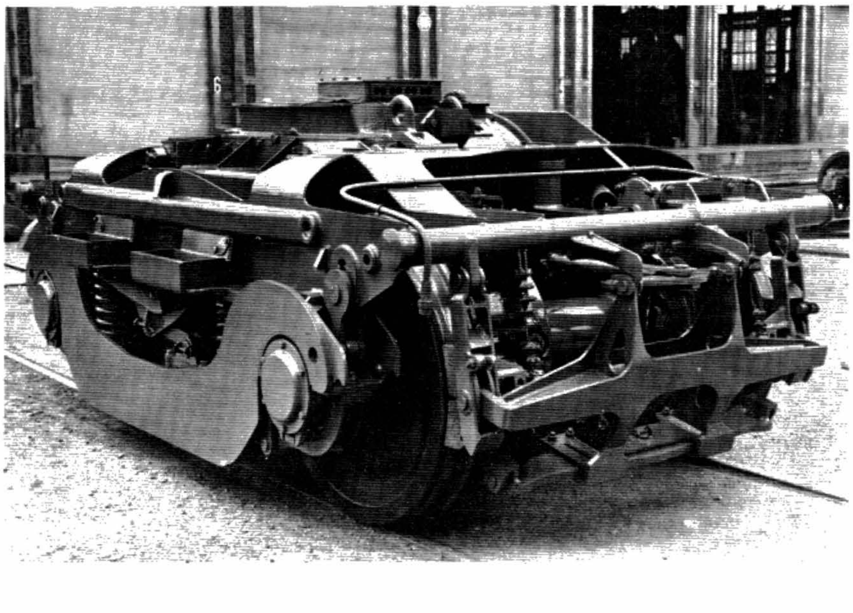
6.5.3. Liaisons caisse-bogies

1° *Liaisons verticales et transversales.* — Sur le matériel ancien la charge de la caisse est transmise à chacun des bogies par l'intermédiaire d'une traverse danseuse équipée de ressorts à pincettes ou hélicoïdaux (constituant l'étage de suspension secondaire) et d'un dispositif de rappel pendulaire à biellettes contrôlant les mouvements transversaux de la caisse.

Actuellement, pour supporter la caisse il est fait appel, notamment dans le cas des bogies moteurs, à des sandwiches caoutchouc semblables à ceux des locomotives. Ils permettent la rotation des bogies et le débattement

Fig. IV-170

Bogie monomoteur des automotrices à courant monophasé 25 kV, 50 Hz ; séries Z 6 100 et 6 300 (*M.T.E.*)



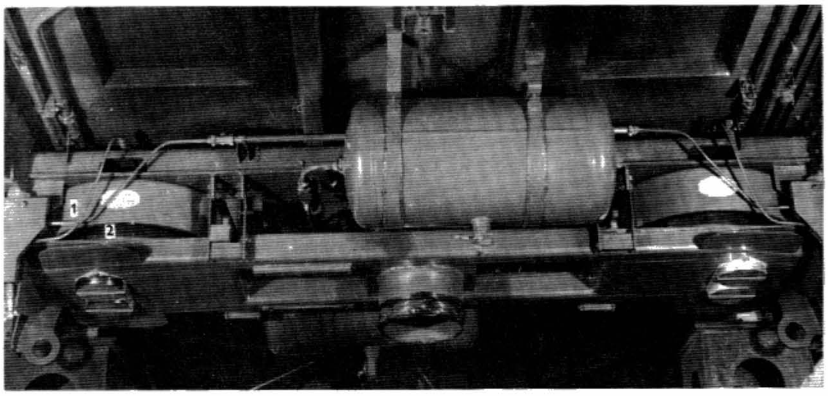


Fig. IV-172

Suspension pneumatique d'automotrice de banlieue
Ressort pneumatique :
1. cloche
2. diaphragme en caoutchouc

transversal de la caisse tout en atténuant notablement la transmission des vibrations du bogie. Ce dispositif joue le même rôle qu'une suspension pendulaire à biellettes mais ne constitue pas à proprement parler une suspension secondaire eu égard à la très faible flexibilité des sandwiches caoutchouc dans le sens vertical. Une excellente solution pour la suspension des caisses consiste à recourir à des ressorts pneumatiques. Cette disposition dont le domaine d'emploi s'étend pratiquement à tous les matériels, procure un très grand confort et permet de maintenir la caisse à un niveau sensiblement constant quelle que soit la charge.

Ce dernier point est particulièrement intéressant pour le matériel de banlieue dans lequel la charge sur les ressorts est majorée aux heures d'affluence d'environ 80 % par rapport à la valeur à vide. Pour éviter qu'une telle variation ne provoque des modifications exagérées de la hauteur de caisse et l'écrasement des ressorts, il est nécessaire d'utiliser des ressorts à flexibilité variable (ressorts hélicoïdaux comportant à l'intérieur un bloc de caoutchouc judicieusement dimensionné). Cependant, sous forte charge, ils présentent l'inconvénient d'être insuffisamment flexibles ce qui réduit le confort.

Pour chaque bogie, la suspension pneumatique comprend deux ressorts pneumatiques fixés sous la caisse et s'appuyant sur la traverse centrale du bogie (fig. IV-172). Chacun de ces ressorts est constitué par une cloche extérieure en tôle, et un socle inférieur avec bossage de centrage, entre lesquels est disposé un diaphragme en caoutchouc, dont les bords renforcés prennent appui sur des couronnes tronconiques, assurant une bonne étanchéité. Pour que la fréquence propre du ressort ait une valeur déterminée, cet élément est relié à un réservoir auxiliaire de volume approprié par l'intermédiaire d'un orifice calibré servant à amortir les oscillations verticales.

Le maintien à hauteur sensiblement constante de chaque ressort sous charge est assuré par une valve de nivellement qui admet ou laisse échapper de l'air comprimé dans le ressort en fonction de la position de la caisse (fig. IV-173). Le volume d'air reste pratiquement constant, seule la pression varie en fonction de la charge. Les deux ressorts d'un même bogie sont reliés pneumatiquement entre eux par l'intermédiaire d'une *valve différentielle ;* en cas d'anomalie de fonctionnement de l'un d'eux, elle permet l'égalisation des pressions (l'écart ne doit pas dépasser 1,2 bar). Ces ressorts ont également une certaine rigidité transversale qui leur permet d'assurer le rappel de la caisse, les oscillations étant amorties par un amortisseur hydraulique. La suspension pneumatique est très répandue sur le matériel ferroviaire japonais à voie étroite (1,067 m) et sur les rames automotrices à grande vitesse de la nouvelle ligne du Tokaïdo. En France, elle est utilisée sur les éléments automoteurs à courant monophasé (25 kV) de la région Nord (Z 6121 à 6185).

2° *Transmission de l'effort de traction.* — La transmission de l'effort de traction de chaque bogie est d'une façon générale assurée par le pivot de caisse. Seuls les bogies monomoteurs sont équipés de barres de traction basse, comme les bogies de locomotive.

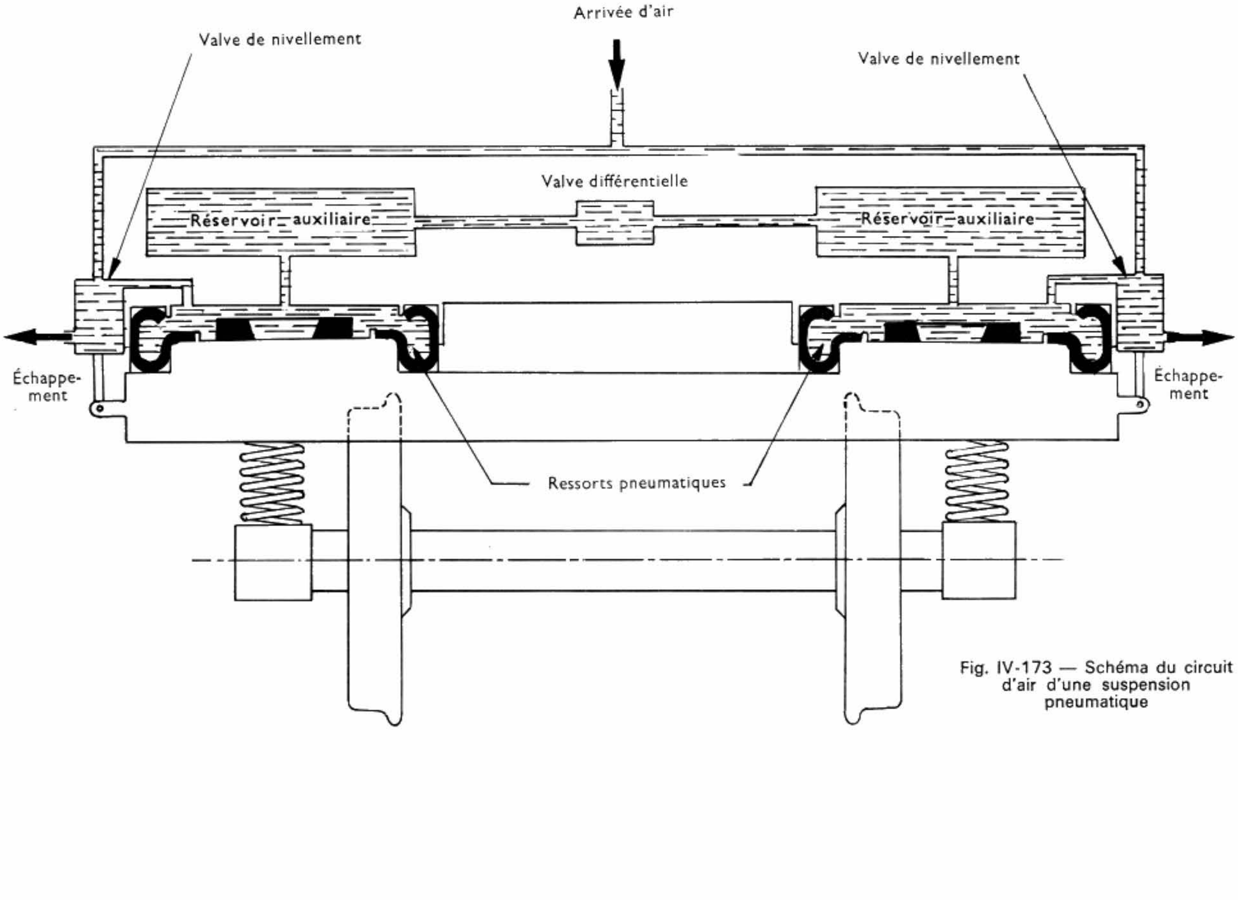


Fig. IV-173 — Schéma du circuit d'air d'une suspension pneumatique

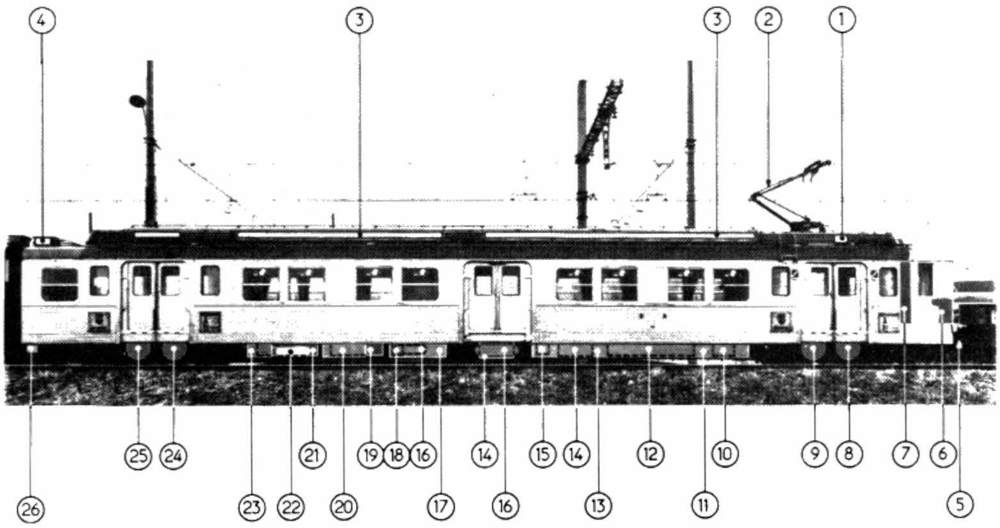


Fig. IV-174

Disposition des différents organes d'une automotrice de banlieue à courant continu

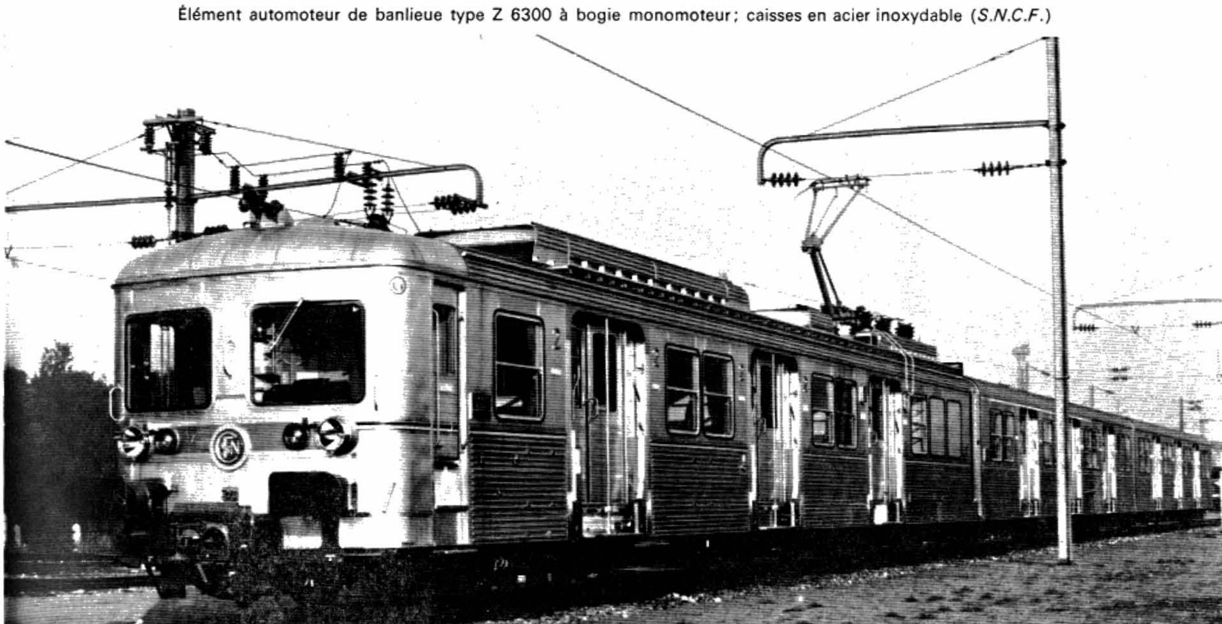
1. Parafoudre
2. Pantographe AM 18 B
3. Rhéostat
4. Coupleurs
5. Autocoupleur Scharfenberg
6. Pupitre de conduite
7. Appareillage auxiliaire
8. Moteur de traction 1
9. Moteur de traction 2
10. Shunt inductif des moteurs
11. Combinateur JH
12. Disjoncteur
13. Isolement des moteurs
14. Batteries
15. Sécheur d'air
16. Réservoirs principaux
17. Bloc de régulation du freinage
18. Shunt inductif des auxiliaires
19. Groupe convertisseur
20. Coffre antipatinage
11. Groupe moteur compresseur
22. Réservoir auxiliaire
23. Résistances des groupes convertisseur-compresseur
24. Moteur de traction 3
25. Moteur de traction 4
26. Distributeur de freinage pneumatique

6.6. Partie électrique. — L'appareillage électrique des automotrices est identique à celui des locomotives et comporte des organes de même nature dans des circuits comparables de traction, de freinage, et de commande. Toutefois, les puissances mises en jeu étant plus faibles, les appareils sont en général de moindre capacité et moins volumineux (cas des disjoncteurs, contacteurs, rhéostats, etc.). Ils peuvent ainsi être installés sous la caisse, sur la toiture ou dans un placard de la cabine de conduite.

La figure IV-174 montre l'emplacement des différents organes d'une automotrice à courant continu (1,5 kV). Les résistances de démarrage, constituées par des bandes d'acier au nickel-chrome enroulées sur chant sur des supports en céramique, sont installées sur la toiture et refroidies par ventilation naturelle. Sur d'autres séries d'automotrices, le rhéostat est parfois disposé sous la caisse, mais il est toujours refroidi naturellement. De même, les moteurs de traction, quel qu'en soit le type, sont toujours autoventilés. En règle générale les automotrices sont prévues pour être utilisées en unités multiples et sont équipées d'un dispositif de démarrage automatique. Dans sa version la plus simple, ce dernier comprend un relais dit « d'accélération », qui est en réalité un relais ampèremétrique ; il permet de contrôler l'équipement de puissance et de veiller à ce que l'intensité du courant dans les moteurs de traction se maintienne à une valeur moyenne constante pendant le démarrage.

Un perfectionnement de cet appareillage consiste à faire varier automatiquement le réglage du relais d'accélération en fonction de la charge de voyageurs de manière à ce que la valeur moyenne de l'intensité pendant le démarrage soit proportionnelle à la masse totale (tare + voyageurs). Dans ces conditions, tous les démarrages, quelle que soit la charge, sont réalisés avec une valeur constante de l'accélération $\left(\gamma = \frac{F}{M}\right)$. Cela est particulièrement intéressant pour les services de banlieue à trafic intense dont les horaires doivent être respectés avec précision pour obtenir le débit maximal. L'asservissement du relais d'accélération à la charge est particulièrement facile à réaliser dans le cas

Élément automoteur de banlieue type Z 6300 à bogie monomoteur ; caisses en acier inoxydable (*S.N.C.F.*)



d'automotrices équipées de suspension pneumatique puisque la pression de l'air dans les ressorts est un paramètre facilement mesurable, caractérisant la charge.

6.7. Éléments automoteurs modernes de la S.N.C.F. — Les tableaux (fig. IV-175 et IV-176, pages suivantes) donnent les caractéristiques principales et les diagrammes des automotrices et des éléments automoteurs modernes de banlieue et de ligne. Ces matériels présentent les particularités suivantes :

— Les automotrices Z 5100 et Z 5300 sont équipées de l'antipatinage par shuntage d'induit. Les Z 5300 sont pourvues du dispositif automatique de réglage de l'effort de démarrage en fonction de la charge et du freinage rhéostatique à excitation séparée, avec régulation électronique de l'effort de retenue ; en outre, leur puissance relativement grande permet de constituer des éléments de quatre caisses.

— Les automotrices Z 6100 et 6300 n'ont qu'un bogie monomoteur, disposé à l'arrière pour améliorer les conditions d'adhérence.

— Les automotrices Z 7100 jouent, sous caténaire à tension continu 1,5 kV, le rôle des autorails et s'accouplent avec les mêmes remorques. Elles n'ont qu'un seul bogie moteur, à 2 moteurs, et permettent le freinage rhéostatique à autoexcitation.

— Les éléments Z 600, utilisés sur la voie métrique de Saint-Gervais à Vallorcine, sont alimentés par un troisième rail sous une tension continue de 750 V, les frotteurs des deux automotrices étant en parallèle. Circulant sur une ligne à fortes déclivités (90 ‰), ces éléments sont équipés pour le freinage à air classique et le freinage rhéostatique ; un freinage de secours par patins magnétiques est également prévu.



Pupitre de conduite en position normale assise des éléments automoteurs de banlieue série Z 5300 (*S.N.C.F.*)



Élément automoteur de banlieue type Z 5300 à bogies bimoteurs, caisses en acier inoxydable (tension continue : 1,5 kV (*S.N.C.F.*)



Automotrice de ligne série Z 7100 (tension continue : 1,5 kV) (*S.N.C.F.*)

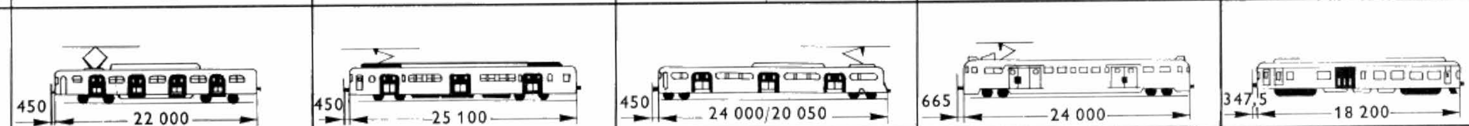
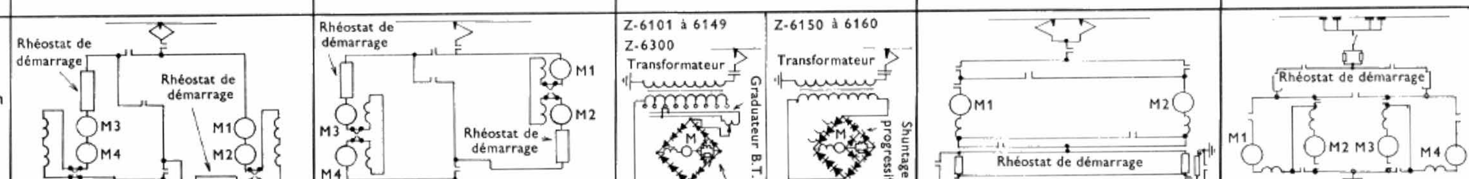
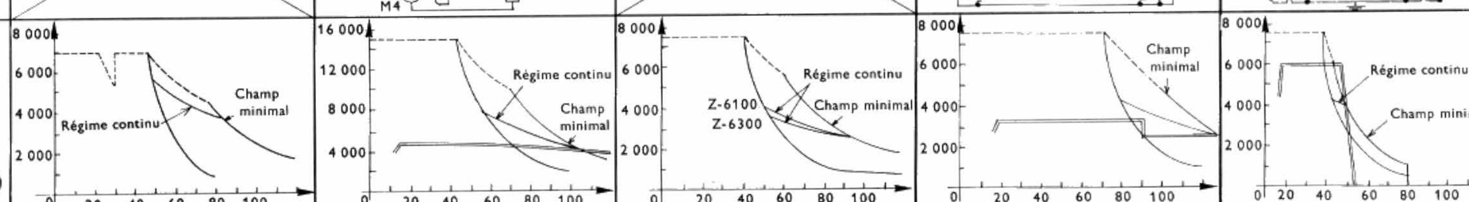
CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES AUTOMOTRICES MODERNES					
	Automotrices de banlieue			Automotrices de ligne	
	Courant continu-1,5 kV		Courant monophasé-25 kV-50 Hz	Courant continu-1,5 kV	Courant continu-750 V
Série	Z-5 100	Z-5300	Z-6100/6300	Z-7100	Z-600
Date de mise en service	1955	1965	1965/1967	1960	1958
Nombre d'engins existants ou prévus	82	58	60 / 35	33	8
Diagramme	 450 — 22 000	450 — 25 100	450 — 24 000/20 050	665 — 24 000	347,5 — 18 200
Puissance (kilowatts)	890	1 180	615	940	400
Vitesse (kilomètres par heure)	56	56	54,7 / 51	79	32,5
Effort (décanewtons)	5 600	7 350	3 960 / 4 250	4 220	4 320
Vitesse maximale (kilomètres par heure)	120	120	120	130	70
Effort à vitesse maximale (décanewtons)	1 570	2 850	1 720 / 1 750	2 350	1 080
Masse totale (tonnes)	57	61	53,2 / 48,8	54,5	40
Type de bogie	2 bogies bimoteurs	2 bogies bimoteurs	1 bogie monomoteur + 1 bogie porteur	1 bogie bimoteur + 1 bogie porteur	2 bogies bimoteurs
Type de redresseurs			Silicium		
Schéma simplifié du circuit de traction	 Rhéostat de démarrage; M3; M4; Rhéostat de démarrage; M1; M2	Rhéostat de démarrage; M3; M4; M1; M2; Rhéostat de démarrage	Z-6101 à 6149, Z-6300: Transformateur; Graduateur B.T.; M — Z-6150 à 6160: Transformateur; Shuntage progressif; M	M1; M2; Rhéostat de démarrage	Rhéostat de démarrage; M1; M2; M3; M4
Schéma simplifié du circuit de freinage électrique		Moteur Excitation séparée; Alternateur; Pont de redresseurs; M1; M2; M3; M4	Shuntage progressif (sur Z-6121 à 6149)	Z-71 21 à 7133; M1; M2	M1; M2; M3; M4
Courbe effort-vitesse ------ Effort moyen au démarrage ═══ Effort moyen de freinage F (décanewtons) V (kilomètres par heure)	 Régime continu; Champ minimal	Régime continu; Champ minimal	Z-6100; Z-6300; Régime continu; Champ minimal	Champ minimal	Régime continu; Champ minimal

Fig. IV-175 — Caractéristiques générales des automotrices modernes

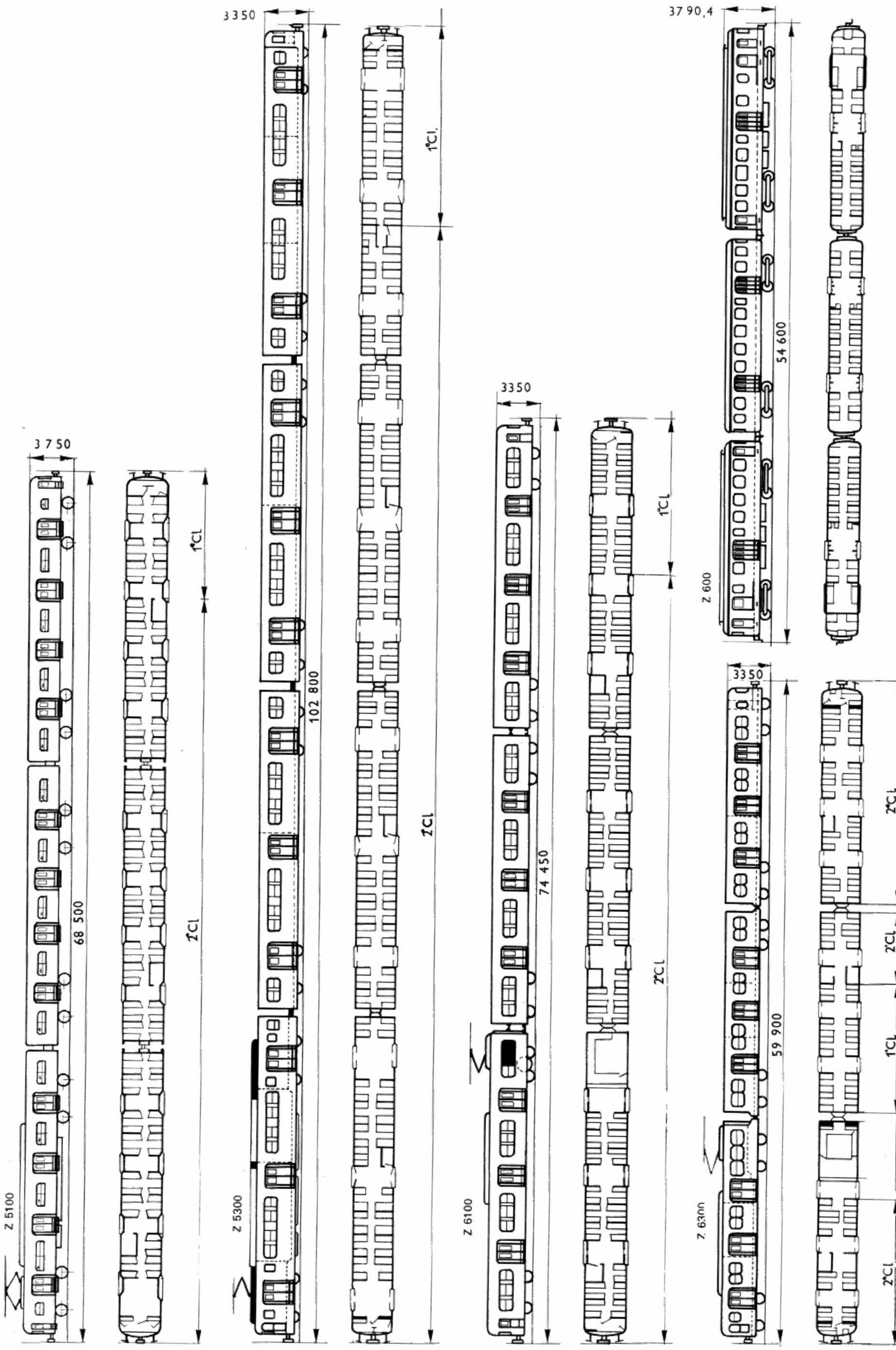


Fig. IV-176 — Diagramme des éléments automoteurs modernes

CHAPITRE V
LA TRACTION À MOTEUR THERMIQUE

1. PRÉMICES

Le premier engin ferroviaire équipé avec un moteur Diesel paraît bien avoir été une locomotive Borsig pesant 95 t dont un moteur Sulzer deux temps de 1 000 ch (735 kW) attaquait directement les deux essieux moteurs; cette locomotive fut construite en 1912 pour les Chemins de fer prussiens.

Les Chemins de fer d'U.R.S.S. mirent en service, en 1923, une locomotive d'une masse de 125 t; conçue par le professeur Lomonossof, équipée avec un M.A.N. de 1 200 ch (près de 900 kW), tournant à 450 tr/mn qui attaquait 5 essieux grâce à une transmission électrique, cette locomotive pouvait circuler à la vitesse maximale de 50 km/h.

Ces moteurs à injection pneumatique de combustible étaient volumineux, lourds, peu aptes aux variations de charge qui constituent l'une des sujétions majeures du trafic ferroviaire. Les carrières de ces ancêtres furent éphémères.

La traction Diesel ferroviaire vit, en fait, le jour lorsque fut industrialisée la commande mécanique de l'injection. Grâce à cette technique il devenait possible de réaliser et de contrôler la répartition de quelques millimètres cubes de combustible finement pulvérisé; en conséquence la voie était ouverte aux moteurs de faible cylindrée unitaire, faciles à installer à bord d'engins de transport terrestre. Le fait supplémentaire que cette opération pouvait être réalisée en quelques millièmes de seconde, et pouvait être renouvelée plusieurs fois par dixième de seconde, incitait tout naturellement à les faire tourner vite. Les faibles dimensions des pièces constitutives de ces moteurs s'inspirant plus de la conception et de l'architecture des moteurs automobiles que des moteurs à gaz de haut fourneau permettaient leur usinage en série, avec tolérances serrées et états de surface poussés, au moyen de machines-outils utilisées à plein temps; par surcroît ces dimensions modestes facilitaient l'exécution de traitements thermiques procurant de bonnes caractéristiques mécaniques. Au total, le prix de revient du kilowatt-diesel allait s'amenuisant au fur et à mesure que croissait la puissance développée par litre de cylindrée.

Ce furent effectivement les techniciens de l'automobile qui construisirent les premiers diesels de transport terrestre, diesels pour camions à 4 ou 6 cylindres de 100 à 120 mm d'alésage, diesels pour autorails à 6 et 12 cylindres de 130 à 140 mm d'alésage.

Ce fut en réalité le diesel qui permit la création de l'autorail et c'est autour d'un diesel qu'en furent conçues les caisses. Ces caisses métalliques, généralement à faces travaillantes, étaient beaucoup plus légères que les voitures à voyageurs traditionnelles, lesquelles, destinées à être incorporées dans de très longs trains, sont soumises à des réactions parfois très violentes.

L'appellation autorail, certes critiquable, offrait l'incontestable mérite de rappeler les analogies que présentent ces engins ferroviaires (utilisés pour la desserte des lignes secondaires en assurant des services omnibus ou semi-directs) avec les véhicules routiers sous le double aspect de la légèreté et de la puissance massique élevée.

2. LES AUTORAILS ET LES AUTOMOTEURS

2.1. L'autorail avant la guerre de 1939-1945 en France et dans le monde. — L'essor de l'autorail fut particulièrement grand en France car les constructeurs de

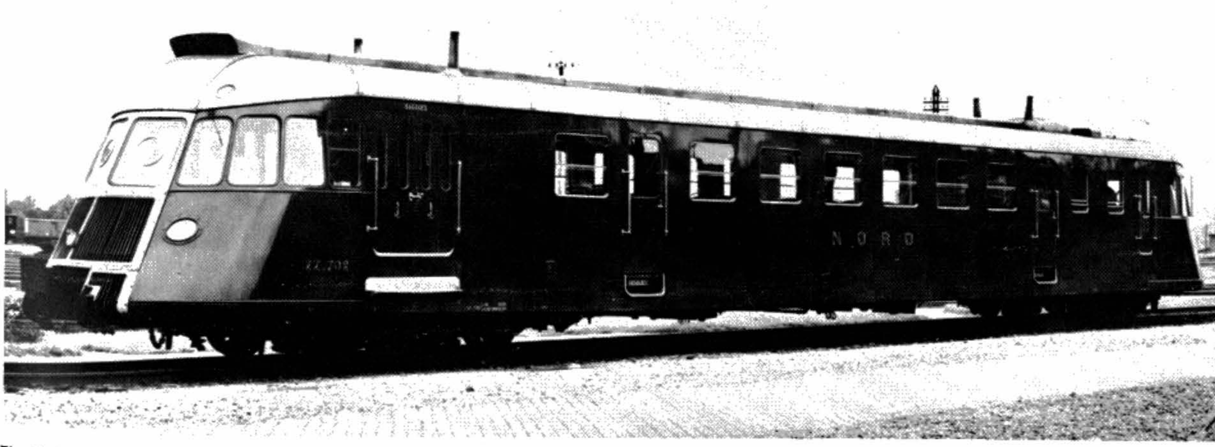


Fig. V-1 — Autorail Renault; longueur 25 m; masse en ordre de marche: 31 t; vitesse maximale: 120 km/h; 71 places; services omnibus et semi-directs sur lignes principales ou secondaires (*S.N.C.F.*)

matériel ferroviaire avaient été durement touchés par la crise de 1930 ; sur un effectif de 45 000 ouvriers ils avaient été contraints, faute de commandes, d'en licencier 25 000. Ils s'attaquèrent donc avec énergie aux nouvelles perspectives offertes. Ces perspectives étaient larges car la plupart des services omnibus ou directs sur les petites lignes n'avaient pas une fréquentation suffisante pour justifier économiquement la circulation d'un train à vapeur de quelques voitures comportant 300 à 400 places. L'engin nouveau constituait donc le substitut tout indiqué du train à vapeur. Certains constructeurs livrèrent des prototypes à leurs risques et périls ; la plupart conservèrent la charge de leurs frais d'étude et d'une partie de leurs frais généraux ; tous offrirent leur connaissance. Certes, les échecs furent nombreux, mais l'expérience acquise servit, en définitive, la cause commune.

Si, en 1935, la vitesse de rotation des diesels était déjà couramment de 1 500 tr/mn, la puissance développée par cylindre de 140 mm d'alésage ne dépassait guère 15 kW et l'on ne pouvait raisonnablement dépasser 6 cylindres en ligne ou 12 cylindres en V car les problèmes torsionnels de vilebrequin étaient encore mal explorés. La puissance maximale des moteurs était voisine de 180 kW avec un rapport masse/puissance proche de 10 kg/kW. Ces moteurs étaient tous à 4 temps. Le plus répandu des moteurs français fut le 12 cylindres Renault qui équipa plusieurs centaines d'autorails, construit par les usines Renault pour les Chemins de fer français (fig. V-1). Ce constructeur, partisan d'une solution dérivant directement d'une technique automobile qui lui était familière, installa le moteur dans la caisse à une extrémité de celle-ci. Les transmissions de puissance aux essieux moteurs s'apparentaient aux transmissions de camions : elles étaient mécaniques avec embrayage à disques, boîte à 4 étages de vitesse avec *synchromesh* et un inverseur marche avant — marche arrière (V. t. 4, La route, chap. 15 et 16).

En fait l'autorail Renault se révéla rapidement apte à assurer non seulement des services omnibus accélérés sur des lignes secondaires mais également des relations directes sur des lignes principales.

Ces moteurs Renault équipèrent les autorails Standard construits par les Aciéries du Nord ; dans ces autorails, dont la plupart étaient bimoteurs, le diesel était placé sur le bogie et entraînait une transmission Winterthur à 5 vitesses possédant chacune son embrayage commandé hydrauliquement. Les autorails construits par De Dietrich possédaient également des bogies équipés avec moteur ; celui-ci était à

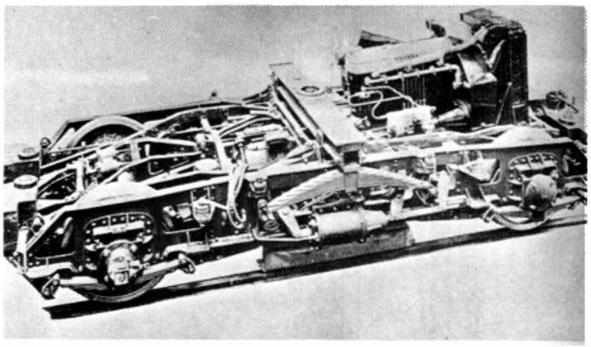


Fig. V-2 — Bogie moteur d'autorail de Dietrich (1935) (*S.N.C.F.*)

l'origine un 2 temps C.L.M. à 4 cylindres développant 75 kW ; à partir de 1934 ce fut un 4 temps Saurer 6 cylindres de 120 kW. La transmission de puissance s'effectuait par une boîte Mylius à 4 vitesses présélectionnées commandées pneumatiquement (fig. V-2).

Berliet et Decauville (fig. V-3) présentaient, quant à eux, des autorails à transmission électrique, équipés respectivement de moteurs Berliet ou Saurer qui furent mis en service sur les lignes montagneuses du réseau P.L.M.

Mais le moteur à essence jouissait alors d'un prestige inégalé et les firmes Bugatti et Hispano-Suiza, constructeurs d'automobiles puissantes, et, pour le second, de moteurs d'aviation, fabriquaient des moteurs utilisables en traction ferroviaire. Bugatti, s'écartant des sentiers battus, construisit des autorails dont le poste de conduite était situé au centre du véhicule dans un kiosque placé au-dessus des moteurs ; ceux-ci, des 8 cylindres en ligne à 125 mm d'alésage et tournant à 2 000 tr/mn, pouvaient ainsi être commandés directement ; cette solution permettait d'offrir une visibilité totale aux voyageurs se trouvant aux extrémités de la caisse. Un tel autorail, faisant partie de la série équipée avec 4 moteurs, établissait le record de vitesse à 192 km/h et dès l'été 1933 assurait le service Paris—Deauville à 110 km/h de moyenne (fig. V-4). Ces performances mettaient en lumière les possibilités de vitesse que les techniciens du rail n'avaient pas encore bien perçues ; elles permettaient également de réaliser l'intérêt de la surpuissance dont, d'ailleurs, Bugatti tirait parti pour simplifier la transmission mécanique en adoptant un simple embrayage hydraulique.



Fig. V-3 — Autorail Decauville ; longueur : 22 m ; masse en ordre de marche : 46 t ; vitesse maximale : 110 km/h ; moteur à 12 cylindres en V ; 62 places ; services omnibus et semi-directs sur les lignes des Alpes (*S.N.C.F.*)

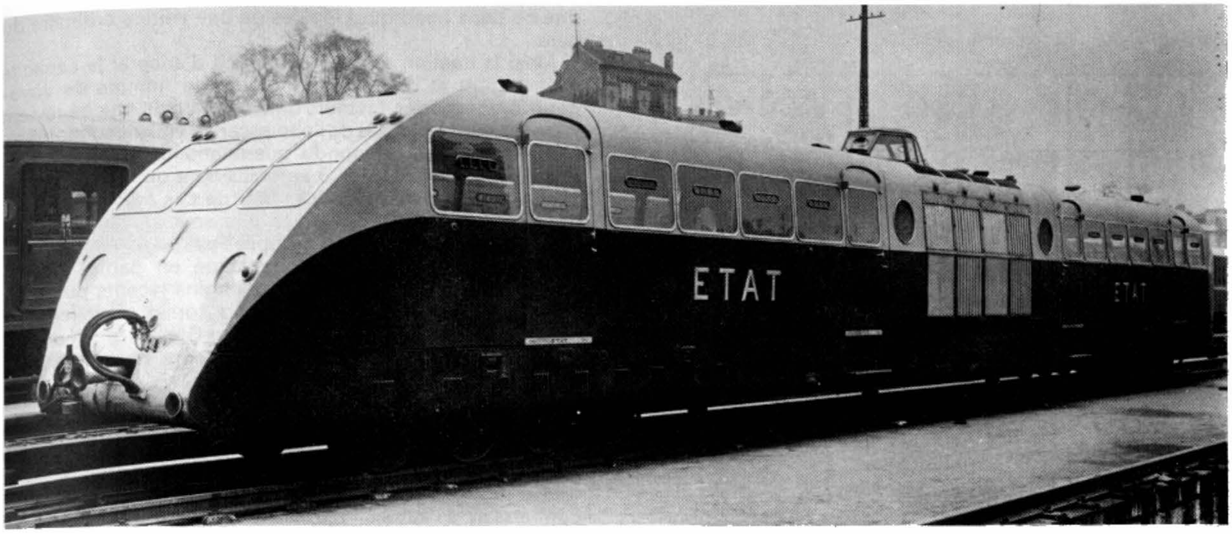


Fig. V-4 — Autorail présidentiel Bugatti ; longueur : 22 m ; masse en ordre de marche : 33 t ; 140 km/h ; 4 moteurs de 145 kW ; 60 places ; services rapides sur lignes principales (*S.N.C.F.*)

Les moteurs Hispano furent choisis par Michelin pour propulser des caisses extrêmement légères en tôle d'aluminium (fig. V-5) reposant sur des roues garnies de pneumatiques (fig. V-6) ; ceux-ci sont, certes, asservis à l'impératif de ne supporter que de faibles charges mais ils portent en eux-mêmes le remède à leur propre faiblesse, car leur faculté d'amortir les chocs destructeurs du joint de rail autorise la construction de caisses plus légères. La masse morte par voyageur transporté, ainsi abaissé à 170 kg, permettait de remarquables accélérations (le coefficient d'adhérence étant, sauf par verglas, supérieur à celui de la roue métallique) sous réserve que le moteur, par ailleurs léger, fût puissant (ce qu'exigeait, d'ailleurs, le coefficient de roulement pneu-rail qui atteignait 8 kilogrammes par tonne) : le moteur à essence s'imposait donc. Mais ces moteurs à essence consommaient une quantité importante d'un combustible coûteux : dès avant la guerre de 1939-1945 les autorails qui en étaient équipés étaient condamnés pour des raisons économiques.

Les esprits avaient également évolué à l'égard des autorails Diesel. Au début, l'intérêt s'était tout spécialement attaché à la création d'engins assurant des dessertes locales à des vitesses nettement supérieures à celles obtenues en traction à vapeur ; il avait fallu, compte tenu de la puissance encore modeste des moteurs, adopter des caisses relativement légères et s'interdire toute adjonction de remorques. Ces autorails étaient donc inadaptés pour écouler les pointes de trafic ; les jours d'affluence l'exploitation était

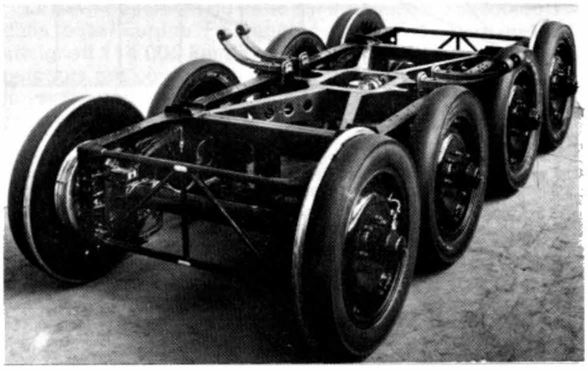


Fig. V-6 — Bogie porteur Michelin (*S.N.C.F.*)

contrainte soit de multiplier les circulations, ce qui n'était pas toujours possible, soit de remplacer l'autorail par des trains à vapeur, ce qui était très onéreux. On se trouva donc très rapidement face à la nécessité d'accroître la capacité des liaisons assurées par autorails :

— soit en réalisant des jumelages, c'est-à-dire des circulations de deux autorails attelés ensemble, conduits chacun par leur propre conducteur, le conducteur de tête transmettant à celui de queue les indications nécessaires au moyen de signaux optiques ou acoustiques ;

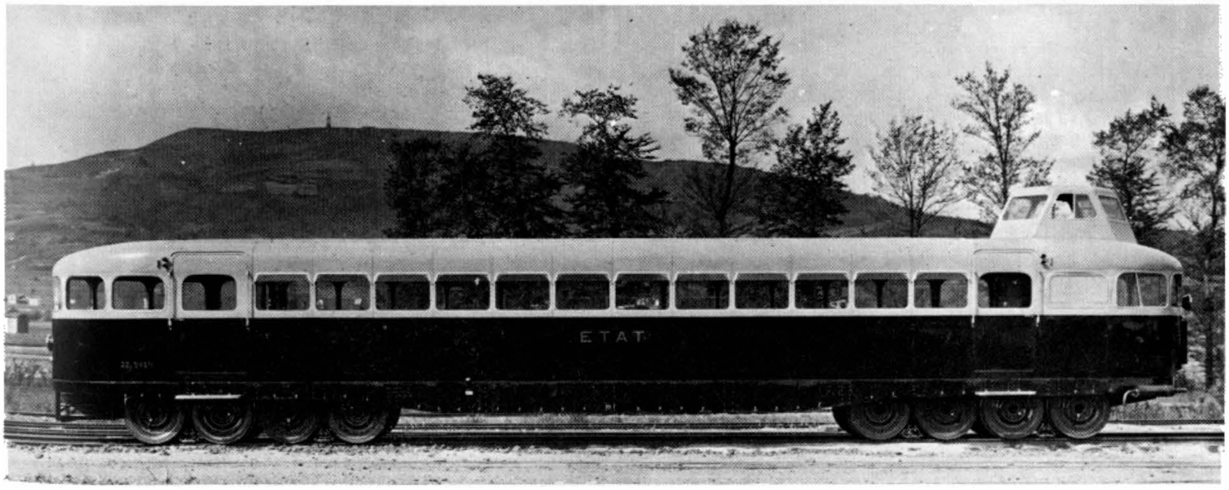


Fig. V-5 — Micheline de 56 places ; longueur : 17 m ; masse en ordre de marche : 11 t ; moteur Hispano de 185 kW à 12 cylindres en V ; vitesse maximale : 110 km/h ; services omnibus et semi-directs (*S.N.C.F.*)

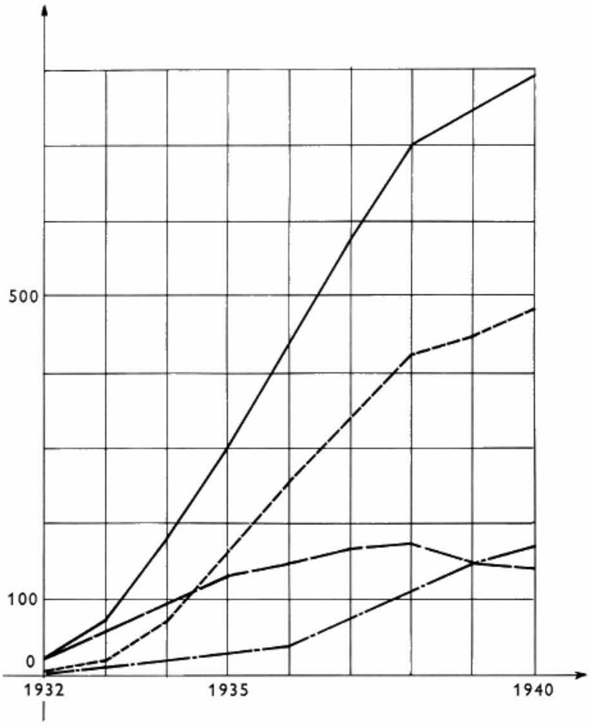


Fig. V-7 — Graphique des effectifs d'autorails S.N.C.F. —— effectif total; — — autorails de faible capacité; - - autorails à bogies de puissance moyenne; — - autorails puissants à bogies

— soit en réalisant des couplages, c'est-à-dire des circulations de deux autorails attelés ensemble, l'autorail de queue étant manœuvré à distance par le conducteur de l'autorail de tête;

— soit en construisant des engins articulés, à deux caisses reposant sur trois bogies;

— soit, à partir de 1937, en mettant en service des autorails équipés de deux moteurs de 12 cylindres en V (Renault ou Saurer) de 225 kW ou d'un seul moteur Renault, 16 cylindres en V; ces autorails pouvaient tirer une ou deux remorques légères ou une voiture ordinaire du parc.

Ainsi la traction autorail permettait d'adapter la capacité de transport et la puissance requise au nombre de voyageurs à transporter, facteurs déterminants du prix de revient kilométrique; les crises de l'adolescence étaient surmontées.

Au début de la seconde guerre mondiale, la S.N.C.F. disposait d'un parc de 800 autorails dont on n'a évoqué ci-avant que les plus répandus: 500 de ces autorails étaient des untiés de 225 kW, à bogies, plus spécialement conçues pour circuler isolément ou groupées par deux, mais inaptes à remorquer; le reste était constitué en parties égales, d'engins de faible puissance et d'engins récents puissants (fig. V-7). Certains de ces types d'autorails assuraient des services en Afrique, en Espagne et en Grèce.

À la même époque, de nombreux pays avaient expérimenté la traction avec moteur à combustion interne. Certains furent des précurseurs. C'est ainsi que dès 1903 des engins construits par la firme française De Dion Bouton, équipés de moteurs à essence de 50 kW, attaquant une transmission électrique, circulaient sur la ligne hongroise Arad—Czanad. La même année la Grande-Bretagne connaissait « l'autocar ferroviaire pétroléo-électrique » en service à Newcastle. L'année 1906 fut particulièrement importante car, aux États-Unis d'Amérique, l'Union Pacific mettait en service des véhicules ferroviaires de construction tout acier aux lignes aérodynamiques, offrant 75 places assises; ils étaient équipés d'un moteur à essence de 150 kW attaquant aux faibles allures une boîte de vitesses et, en prise directe, une transmission à chaînes. Dès 1913 la Suède possédait un autorail léger équipé d'un moteur Diesel de 60 kW avec transmission électrique.

Cependant, dans la plupart des pays, le trafic autorail Diesel débuta, tout comme en France, entre 1930 et 1935. En Allemagne, des rames à deux caisses, capables de vitesses supérieures à 150 km/h (elles étaient équipées avec des moteurs Maybach de 300 kW accouplés à une transmission électrique), rames nommées *Fliegende Hamburger*, assurèrent dès 1933 le service rapide Berlin—Hambourg. On notera à ce propos que des rames à trois caisses, dérivées de ces rames allemandes et construites en France pour la Compagnie du Nord par la Société Franco-Belge, assurèrent entre autres les services Paris—Lille en 2 h 30 mn (avec deux arrêts intermédiaires) et Paris—Liège (fig. V-8).

Toutefois, en 1937 le parc d'autorails allemands était assez disparate: des engins à 2 ou 4 essieux, équipés de

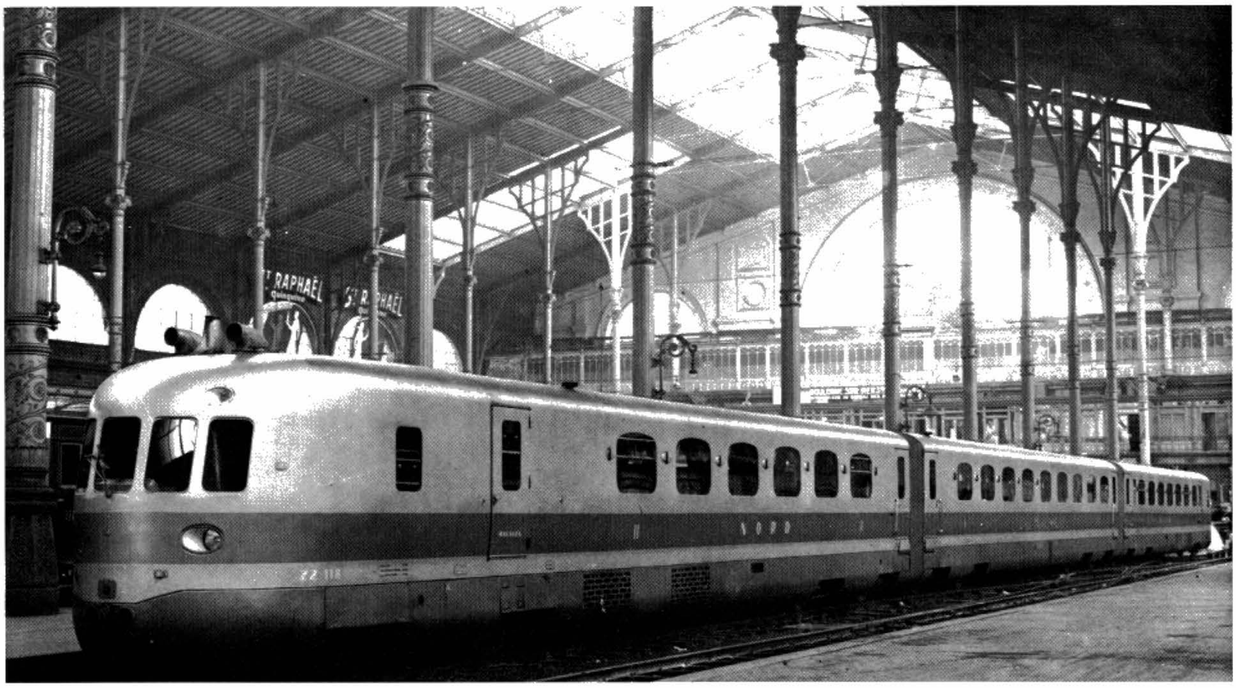


Fig. V-8 — Rame triple franco-belge à 2 diesels Maybach de 300 kW, à transmission électrique Jeumont; longueur: 70 m; masse en ordre de marche 135 t; vitesse maximale: 140 km/h; 142 places; buffet-bar; services rapides sur lignes de la région Nord (*S.N.C.F.*)

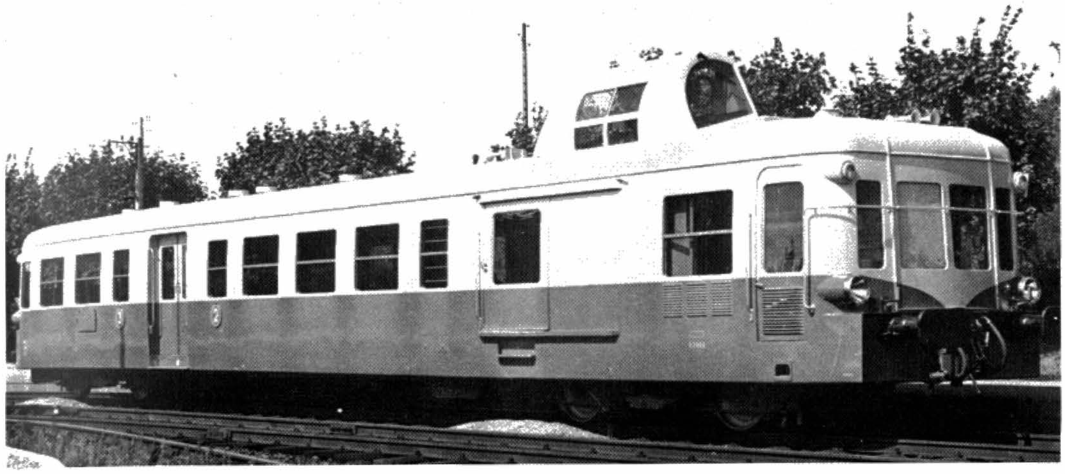


Fig. V-9

Autorail unifié monomoteur à bogies (*S.N.C.F.*)

diesels dont la puissance s'échelonnait entre 100 et 300 kW, étaient, en nombre équivalent, munis soit de transmissions électriques soit de transmissions mécaniques, la transmission hydraulique étant alors en cours d'expérimentation.

En Grande-Bretagne, seul le réseau du *London and North Eastern* possédait un service autorail, assuré par une centaine d'engins équipés, non d'un diesel, mais d'une chaudière à vapeur type *Sentinel* à vaporisation instantanée.

La Belgique, le Danemark et la Hollande possédaient des rames s'inspirant des rames allemandes mais de fabrication nationale (La Brugeoise, Baume et Marpent pour la Belgique, Frichs pour le Danemark), équipées de plusieurs diesels Maybach, Ganz, Mercedes-Benz ou Frichs de 180 à 300 kW de puissance unitaire, et des autorails à 2 ou 4 essieux équipés d'un diesel de même origine que ceux de ces rames. Cependant un certain nombre d'autorails danois étaient munis de moteurs à essence.

La Hongrie était pourvue d'un service autorail important; les engins à 2, 3 ou 4 essieux, tous pratiquement à transmission mécanique, étaient équipés de diesels Ganz de diverses puissances.

Les nombreux autorails italiens étaient équipés de moteurs à essence Fiat (d'une puissance de 60 à 90 kW) et de transmissions mécaniques. Des moteurs à essence fournissaient également la puissance motrice de nombreux autorails norvégiens et suédois; leur puissance était comprise entre 75 et 175 kW suivant les types. Les Chemins de fer tchécoslovaques assuraient un important service autorail avec deux catégories d'engins bien distinctes: d'une part, des autobus sur rails, légers, de faible vitesse pour les lignes secondaires et, d'autre part, des autorails rapides avec moteurs puissants pour les lignes principales. Les transmissions en étaient soit mécaniques, soit électriques; les moteurs étaient soit à essence (Skoda) soit Diesel (C.K.D.). Un certain nombre des autorails tchécoslovaques était équipé avec une transmission mécanique-électrique « Sousedik », fort originale, réunissant les avantages de la transmission électrique (grand effort au départ, montée en vitesse très douce, adaptation automatique de l'effort moteur à l'effort résistant) et de la transmission mécanique (rendement élevé aux grandes vitesses).

Aux États-Unis d'Amérique, le problème se posait différemment qu'en Europe: les réseaux, qui devaient alors s'occuper activement du transport voyageurs à grande distance, s'orientèrent vers des trains légers à plusieurs voitures dont les caisses étaient construites soit en acier inoxydable par Budd, soit en aluminium par la Pullman. Ces trains « Zephyr » obtinrent un grand succès, particulièrement sur des trajets de plus de 1 000 km qui s'effectuaient auparavant en traction à vapeur à 60 km/h de moyenne et qui connurent des circulations à plus de 100 km/h. Les motrices de ces trains étaient équipées avec des groupes électrogènes à diesel lent, généralement des General Motors à deux temps, dont les puissances unitaires étaient comprises entre 450 et 900 kW, la puissance motrice totale de certains de ces trains pouvant dépasser 2 500 kW.

Le développement du trafic par autorail a été spectaculaire dans toute l'Europe. En France, ce trafic, inexistant en 1931, atteignait 114 000 km de parcours journaliers fin 1936. Ces parcours ont continué à croître; ils ont atteint 290 000 km journaliers en 1969 et tendent à se stabiliser à cette valeur avec un parc à peu près constant de 1 100 unités.

À vrai dire, si avant 1939 on n'avait pas pu chiffrer d'une façon nette le bilan économique de l'autorail vis-à-vis de la vapeur du fait de l'hétérogénéité du parc, l'exploitant avait cependant pu apprécier l'avantage de l'autorail dans le domaine des vitesses commerciales, en service courant et, en particulier, sur les voies dont l'armement léger impose une limitation de vitesse aux engins plus lourds. Ses possibilités d'accélération et de freinage, sa puissance massique élevée, sa réversibilité de marche, son rayon d'action lui confèrent, en effet, une nette supériorité dans les services à arrêts fréquents et sur des parcours présentant des points singuliers (rebroussements, par exemple). L'autorail permet une « rotation » plus rapide que la locomotive.

2.2. L'autorail des années 1950-1970

2.2.1. Situation en France — Apparition des automoteurs. — Le parc français d'aujourd'hui est beaucoup plus homogène que le parc d'avant 1939. L'hétérogénéité des années 1935-1940 avait été fructueuse: la dure expérience des services réguliers ayant révélé celles des solutions qui étaient rentables il avait été possible de dégager une politique d'utilisation. Mais cette diversité d'engins présentait de très sérieuses difficultés pour les services chargés de l'entretien et de la réparation. Après 1945 la situation se clarifia et trois séries d'engins furent normalisées:

1° Deux types d'engins de faible puissance (diesels Panhard de 65 kW et Renault ou Saurer de 110 kW) à 2 ou 4 essieux (dont 1 seul moteur), légers (12 et 17,5 t en ordre de marche), à transmission mécanique avec boites à 4 vitesses (type camion). Ces engins, dont la vitesse maximale était modeste (60 et 90 km/h) ainsi que la capacité (43 et 63 places assises), étaient destinés à la desserte de lignes affluentes relativement peu fréquentées, de faible longueur et de profil facile, la puissance massique étant faible (3,4 et 4 kW/t). Cent cinquante engins (respectivement 60 et 90) de ces deux types furent construits entre 1948 et 1954 mais la fermeture des petites lignes d'intérêt local les voue à la disparition pure et simple.

2° Deux types d'engins à bogies, équipés avec 1 ou 2 diesels à 12 cylindres en V de 250 puis 265 kW (Renault) ou 255 kW (Saurer) dans la caisse et avec une transmission mécanique Renault à 4 vitesses du type d'avant 1939, capables de circuler à 120 km/h, relativement lourds (31,5 t pour le monomoteur, 43 t pour le bimoteur, en ordre de marche) à transmission mécanique avec boîte à 4 vitesses (fig. V-9). Ces engins, construits, de 1951 à



Fig. V-10 — Rame à grand parcours affectée au T.E.E. (Trans-Europ-Express) ; longueur : 26 m ; masse en ordre de marche : 48,5 t ; vitesse maximale : 140 km/h ; nombre de places : 56 ; services directs sur voies principales (*S.N.C.F.*)

1961, à 250 exemplaires monomoteurs (par la Régie Nationale des usines Renault, les Ateliers du Nord de la France ou De Dietrich) et à 78 exemplaires bimoteurs (par Decauville) étaient destinés à assurer des relations directes et omnibus sur les lignes principales et sur les affluentes à fort trafic. L'engin bimoteur avec ses 4 essieux moteurs était plus spécialement utilisé sur les lignes à profil accidenté des Alpes et du Massif Central ou dans les régions à très forte densité de population du fait de son aptitude à tracter deux ou trois remorques.

3° Des rames, dites rames à grand parcours (R.G.P.), à confort amélioré, constituées d'une motrice et d'une remorque avec cuisine et poste de conduite (permettant la réversibilité du sens de marche de l'ensemble), capables de circuler à grande vitesse et destinées, en première analyse, à des relations transversales telles que Lyon—Bordeaux, Lyon—Nantes, Genève—Port-Bou. Les vingt premières de ces rames, construites en 1954 et capables de 120 km/h, furent équipées avec deux diesels Renault de 250 kW et deux transmissions mécaniques Renault classiques logés comme de coutume dans la caisse. Les 29 suivantes, construites en 1955 et 56 (fig. V-10) reçurent dans la caisse un seul diesel de 605 kW, également à 12 cylindres en V mais suralimenté (moteur Marep-Grosshans-Ollier dit M.G.O.) entraînant une transmission hydromécanique Mekydro, construite par Maybach, constituée d'un convertisseur de couple hydraulique et d'une boîte à 4 vitesses à changement d'étage automatique. Ces rames étaient capables de 140 km/h. Les 9 dernières, spécialement affectées au trafic international Trans-Europ-Express (Paris—Amsterdam, Paris—Zurich, Paris—Dortmund, Lyon—Milan) ne possédaient que 3 fauteuils par travée ; leur capacité en était réduite de 56 à 39 places en ce qui concerne les motrices et de 56 à 42 en ce qui concerne les remorques (8 remorques sans cuisine limitées au service intérieur offraient 76 places chacune).

Ce matériel, relativement lourd (45 à 50 t pour les motrices, 32 t en moyenne pour les remorques), fut construit par De Dietrich (motrices) et Brissonneau et Lotz (remorques).

La comparaison des dépenses de traction du train à vapeur léger et de l'autorail conduisait à diverses constatations :

— l'autorail Diesel permettait une économie de 50 à 90 % des frais kilométriques de combustible, du fait de la réduction de tonnage et de la puissance nécessaires, d'une part, du rendement particulièrement faible de la locomotive à vapeur en service discontinu, d'autre part ;

— l'autorail étant conduit par un seul agent, les dépenses de conduite étaient réduites de 50 % ;

— l'entretien de l'autorail coûtait, selon la puissance, une fois et demie à quatre fois moins cher au kilomètre que celui des locomotives utilisées précédemment sur les mêmes services ;

— les annuités d'amortissement d'un autorail étaient relativement élevées car la durée de vie admise est plus courte que pour le matériel lourd.

Finalement le prix de revient kilométrique traction s'avérait compris entre le quart et la moitié de celui d'un train à vapeur léger, donc suffisamment avantageux pour permettre, tout en conservant une marge d'économie appréciable, d'augmenter dans de nombreux cas la fréquence des circulations.

Ainsi le prix de revient kilométrique d'une motrice de 500 kW et d'une remorque offrant 104 places était, en 1954, voisin de la moitié de celui d'un train vapeur de 300 places. Le remplacement d'un train vapeur par une telle circulation diesel était donc tout à fait rentable lorsque la capacité de l'engin Diesel permettait ce remplacement. L'opération perdait de son intérêt économique si deux ensembles étaient nécessaires ; dans ce dernier cas, elle ne se justifiait plus que par la qualité du service assuré (vitesse en particulier).

Ce fut la raison pour laquelle, à partir de 1955, les commandes d'autorails type bimoteurs de 500 kW de la deuxième catégorie furent remplacées par celles d'autorails équipés avec un groupe moteur 605 kW M.G.O. Mekydro qui, aptes à accepter trois remorques, prirent le nom d'*autorails service courant*. Les 119 exemplaires furent construits par Decauville (16) et la R.N.U.R. (103).

En 1959, la S.N.C.F. mettait en service un matériel d'une conception nouvelle dont l'étude et la réalisation furent confiées à la R.N.U.R. L'objectif était d'accroître le confort moyen offert aux voyageurs tout en obtenant la capacité maximale. Pour cela les moteurs ont été placés sous la caisse ; à l'époque les diesels horizontaux ne dépassant pas 450 kW on préféra placer un moteur M.G.O. de 605 kW aussi bas que possible entre les bogies en aménageant au-dessus un compartiment voyageurs, solution offrant des conditions de visibilité particulièrement satisfaisantes, surtout sur les lignes à caractère touristique. C'est ainsi que furent construits dix autorails panoramiques (fig. V-11) à transmission électrique. L'habitacle supérieur est réalisé en résines polyesters armées par tissu de verre ; les effets du rayonnement furent limités par l'adoption de glaces constituées de deux feuilles, (celle extérieure étant en verre *Athermic*), séparées par une pellicule de Butiral dans laquelle est placé un réseau serré de fils fins chauffants pratiquement invisibles. Il faut reconnaître que les opérations d'entretien de ce séduisant engin sont difficiles du fait du peu d'accessibilité au groupe électrogène.

À la même époque l'expérience avait montré que le pourcentage des parcours effectués par des autorails circulant isolément était devenu très faible ; elle conduisit à ne plus retenir que deux catégories d'autorails pour les grandes séries ultérieures. La première est l'autorail dit *service courant* ci-dessus mentionné. La seconde est un élément automoteur, comportant deux caisses posées

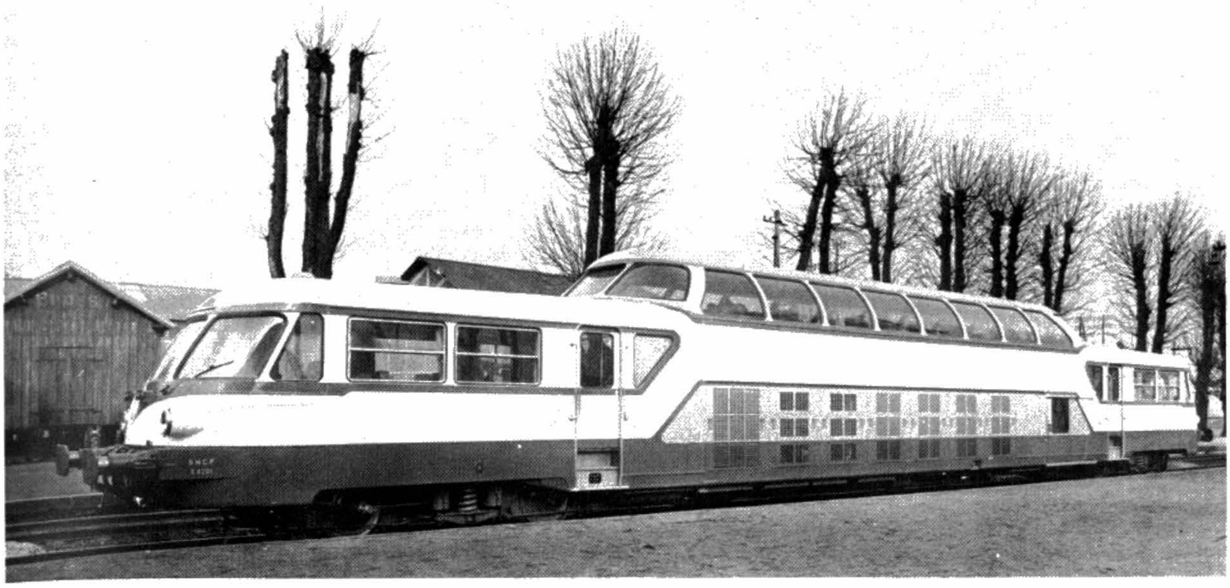


Fig. V-11 — Autorail panoramique; longueur: 27 mètres; masse en ordre de marche: 55 t; 88 places; vitesse maximale: 130 km/h; services directs ou semi-directs; apte à remorquer (*S.N.C.F.*)

chacune sur deux bogies (1 motrice à 1 bogie moteur et 1 remorque), caisses inséparables en service; cet élément est pourvu d'une cabine de conduite à chaque extrémité (fig. V-12). La traction est assurée par un diesel de 330 kW (Poyaud ou Saurer), de 6 cylindres en ligne, suralimentés, horizontal et disposé sous la caisse. La transmission mécanique est à 8 vitesses, de conception et de construction De Dietrich, à commande automatique, ce qui offre l'avantage de permettre la marche de 3 éléments accouplés.

La vitesse maximale de ces automoteurs est de 120 km/h. Chaque élément offre 150 places pour une masse, en ordre de marche, de 59 t (respectivement 35,5 et 23,5 t).

Les Ateliers du Nord de la France ont assuré l'entreprise générale et la construction des caisses des 304 éléments qui furent mis en service ou commandés entre 1963 et 1970. Leur caisse est particulièrement robuste puisque, lors des essais de compression statique, elle a supporté, sans contraintes excessives, un effort de 150 000 daN au niveau des tampons, ce qui n'avait jamais été réalisé en France pour les autorails. Les portes d'accès sont placées au droit des pivots de bogie, endroit où le marchepied est, géométriquement, le plus facile à réaliser. Par ailleurs, un effort important a été accompli pour améliorer la suspension, l'insonorisation, le chauffage et la visibilité.

2.2.2. Situation générale hors de France. — Tout comme en France le type de trafic à assurer, fonction au premier chef des conditions de géographie physique et humaine, fixa les caractéristiques fonctionnelles des autorails et rames Diesels.

En Allemagne on construisit un parc important (un millier d'engins environ) d'autorails légers à 2 essieux équipés d'un ou deux diesels Bussing de 110 kW, à transmission mécanique et à 6 vitesses, pouvant circuler à 90 km/h.

La *Deutsche Bundesbahn* (D.B.) a, par ailleurs, étendu son parc d'engins Diesel automoteurs à plusieurs caisses offrant jusqu'à 260 places et capables de circuler à 140 km/h. Ils sont équipés de 1 ou 2 diesels Maybach, Mercedes ou M.A.N. à 12 cylindres en V suralimentés, tournant à 1 500 tours par minute, développant 800 kW et entraînant une transmission Mekydro ou une transmission purement hydraulique Voith. Un trait caractéristique important réside dans l'impératif fixé par la D.B.: les trois types de diesels devaient être interchangeables, ce qui imposait des conditions de montage (assises, position du vilebrequin) et de raccordements (tuyauteries d'eau, d'admission d'air, d'échappement de gaz, etc.) identiques. Il en était de même pour les transmissions.

Pour le service des rames Trans-Europ-Express, alors que la S.N.C.F. (imitée en cela par les Chemins de fer italiens) se limitait strictement au programme imposé, la D.B. et à un degré moindre l'association hollando-suisse assurait largement ce programme en construisant des rames à grand

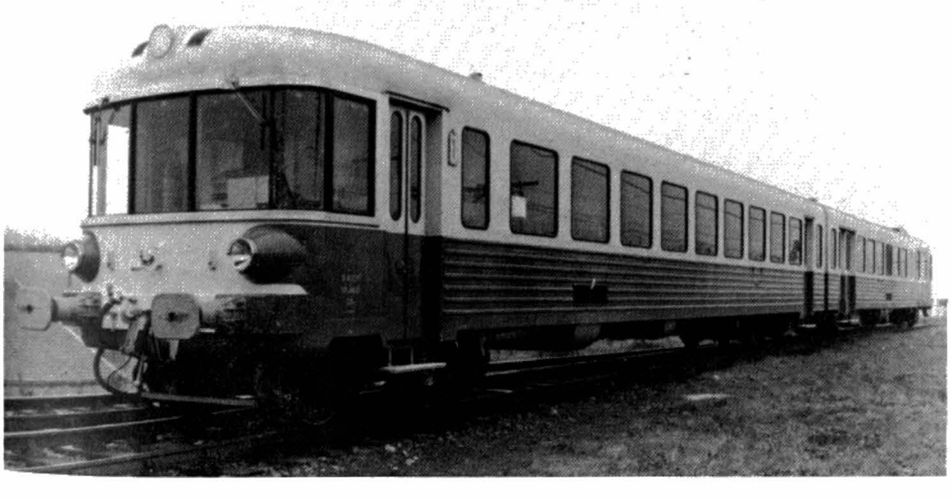


Fig. V-12

Élément automoteur de 330 kW
Masse totale en ordre de marche: 35,5 t+23,5 t
Nombre de places: 62+81
(*S.N.C.F.*)

confort (conditionnement de l'air, service des repas dans une voiture restaurant). La rame allemande capable de 140 km/h était constituée de 2 motrices encadrant 5 voitures ; longue de 131 m (contre 79 pour la française), d'une masse de 214 t (contre 132), elle offrait 122 places (contre 120). Chaque motrice était équipée avec un diesel de traction du type équipant les rames du service intérieur (Maybach, Mercedes ou M.A.N. de 800 kW) et d'un groupe auxiliaire Diesel de 170 kW fournissant l'énergie électrique nécessaire (alimentation triphasée 220/380 V) pour le conditionnement d'air, l'éclairage, la cuisine, le compresseur, etc. de la rame.

La Belgique restait fidèle à l'autorail dans les conceptions qu'elle avait définies avant 1939.

Le Danemark, dont les lignes à peu près sans rampes desservent une contrée à très forte densité démographique, donnait la prééminence aux autorails lourds et puissants.

L'Espagne mettait en service des rames triples, entre Madrid et les principaux ports espagnols (deux motrices et une remorque) ; construites par F.I.A.T., elles étaient équipées de deux moteurs horizontaux de 320 kW disposés sous les caisses et attaquant les deux essieux de chaque bogie extrême par une transmission mécanique à 5 vitesses. Mais l'industrie espagnole avait conçu et réalisé une rame tractée Diesel extrêmement originale, le train T.A.L.G.O. (*Train Articulé Léger* des ingénieurs Goicoechea et Oriol) mis en service, dès 1950, entre Madrid et Irun sur une ligne particulièrement difficile en raison des importantes différences d'altitude des régions traversées. Derrière la locomotive sont attelées des voitures légères reposant en leur partie postérieure (étant considéré le sens de marche du train) sur une paire de roues élastiques qui, moyennant un système guidé approprié, maintiennent un axe imaginaire d'une manière stable à 90° par rapport à l'axe longitudinal ; la partie antérieure repose sur l'élément qui le précède au moyen d'accouplements latéraux spéciaux, ce qui permet au train de constituer un ensemble parfaitement articulé sans séparation entre les différentes unités. L'ensemble revêt l'apparence d'une chenille dont la résistance à l'air est relativement faible grâce à l'abaissement du centre de gravité et à la diminution du maître-couple en résultant. Les rames T.A.L.G.O. assurent actuellement des services à grande distance rayonnant autour de Madrid et le service Trans-Europ-Express Genève—Barcelone, sous une forme qui fut rénovée en 1965, les locomotives étant plus puissantes (1 750 kW pour la traction et 370 kW pour la fourniture d'air conditionné) et la capacité de la rame étant portée à 352 places.

La diesélisation des chemins de fer britanniques fut tardive mais extrêmement rapide tant dans le domaine autorails que dans le domaine locomotives comme on le verra ci-après. Cet essor fut basé autour d'un ensemble moteur unifié, éprouvé durant plusieurs années sur plusieurs milliers d'autobus londoniens : le diesel B.U.T. (*British United Traction*) soit du type Leyland soit du type A.E.C., les deux versions étant rigoureusement interchangeables et ne différant que par des détails de construction ; ce sont des 6 cylindres, 4 temps, non suralimentés, développant une puissance de 110 kW en tournant à 1 800 tours par minute. Ils sont légers (944 kg). Placés horizontalement, par paire sous la caisse, ils entraînent chacun l'essieu intérieur du bogie voisin par une transmission mécanique à 4 vitesses du type Wilson épicyclique à commande pneumatique (transmission *Self Changing Gears*) avec roue libre. D'autres engins, en nombre plus réduit, furent équipés de moteurs Rolls-Royce ou Paxman plus puissants que les premiers, mis en œuvre dans les mêmes conditions, la conception du moteur horizontal ayant été élevée à la hauteur d'une doctrine. En ce qui concerne les aménagements de caisse, on remarque le souci d'offrir aux voyageurs le maximum de clarté grâce à des baies descendant très bas et des postes de conduite à vue très dégagée. À côté de ces autorails standards construits à plusieurs milliers d'exemplaires, en diverses versions, il faut signaler les rames Pullman à huit éléments destinées aux liaisons rapides, autorails de luxe, qui, équipés avec 2 diesels de 800 kW et une transmission électrique, circulent à 145 km/h et sont les répliques insulaires des plus luxueux T.E.E. continentaux.

En Hongrie, la société Ganz mit en fabrication en 1951 des rames automotrices de grande ligne destinées à de grandes relations : deux motrices encadrant 4 remorques. Chaque motrice possède un diesel de 500 kW, 16 cylindres en V non suralimentés, tournant à 1 100 tr/mn, en entraînant une génératrice de traction.

L'Italie fournit un excellent exemple des avantages du transport autorail ; l'exploitation de ces engins fut basée sur le principe de les faire circuler en supplément du service des trains de grandes lignes pour améliorer la desserte de ces lignes et non pour remplacer ces trains ; néanmoins ces autorails assurent tout le service voyageurs local dans le Sud du pays et en Sardaigne et Sicile. La technique italienne se caractérise par l'utilisation systématique de diesels horizontaux de 350 kW, Breda ou Saurer, entraînant une transmission mécanique ou hydraulique.

Les Pays-Bas, quant à eux, ont normalisé l'exploitation par rames à 3 ou 5 caisses, rames accouplables pour constituer de véritables trains. Les diesels sont généralement des Werkspoor suralimentés, développant 450 kW à 1 400 tr/mn et entraînant une transmission électrique.

Aux États-Unis d'Amérique, l'autorail proprement dit apparut en 1950, sous l'aspect d'un engin lourd (51 t) le Budd R.D.C. ; la charpente et les panneautages de caisse sont en acier inoxydable et assemblés par points de soudure. L'ensemble moteur (deux diesels 2 temps General Motors de 200 kW, deux transmissions hydrauliques Allison, attaquant chacune l'essieu intérieur du bogie adjacent) était placé sous caisse, avec inclinaison de 20° sur l'horizontale, suivant une disposition rappelant celle des chars lourds de l'armée américaine. Le nombre d'engins, destinés à l'exploitation de lignes secondaires resta modeste (vitesse maximale : 137 km/h, avec des accélérations et décélérations élevées).

Durant ces 20 années la traction « autorail » s'est donc répandue dans le monde entier sous des formes qui dépendaient d'une part des caractères géographiques des régions, d'autre part des caractéristiques des engins construits par les industriels des nations à vocation exportatrice, compte tenu des relations existant entre les intéressés.

2.3. L'autorail de 1970 — Utilisation de la turbine à gaz. — En 1930 le concurrent du rail était la route. En 1970, un autre concurrent est à considérer : l'avion. La vitesse devient un élément d'appréciation prépondérant. Mais toute augmentation de vitesse impliquant, d'une part, l'accroissement de la puissance motrice et, d'autre part, des engins n'exerçant sur le rail que des efforts modérés, il faut augmenter la puissance massique de l'équipement moteur. Il vient tout naturellement à l'esprit d'utiliser la turbine à gaz aéronautique dont les progrès furent spectaculaires durant les vingt dernières années, grâce aux moyens considérables consacrés aux études et aux essais par les aviations militaires.

Compte tenu des caractéristiques de la traction ferroviaire où l'effort moteur n'est pas basé sur la libération d'une quantité de mouvement mais sur la mise en œuvre d'un effort appliqué sous forme de couple en un point déterminé, il importe que cette turbine comporte son propre convertisseur de couple moteur, donc qu'elle soit du type à deux arbres. En conséquence, il devient alors possible d'adopter une transmission mécanique très simple entre turbine et essieu moteur.

Un véhicule expérimental (fig. V-13) fut réalisé fin 1966 dans les Ateliers du Mans de la S.N.C.F. en partant d'un automoteur de 330 kW, engin qui, lors d'essais spéciaux, avait démontré sa très bonne stabilité de marche jusqu'à 210 km/h et dont les extrémités furent profilées afin d'améliorer la pénétration dans l'air à grande vitesse. Une turbine Turboméca, d'un type déjà utilisé sur les hélicoptères Super Frelon entre autres, possédait après détarage la puissance de 860 kW requise pour conférer à un véhicule ferroviaire de 80 t une vitesse supérieure à 200 km/h ; elle fut installée dans la remorque de l'automoteur, ainsi transformé en motrice turbine à gaz, la motrice Diesel, conservée avec son équipement d'origine, ne subissant que la seule modification du rapport d'engrenages de pont moteur pour tenir compte de l'accroissement de la vitesse maximale.

D'importants essais préliminaires furent réalisés au centre d'essais des propulseurs de Saclay ; ils permirent la

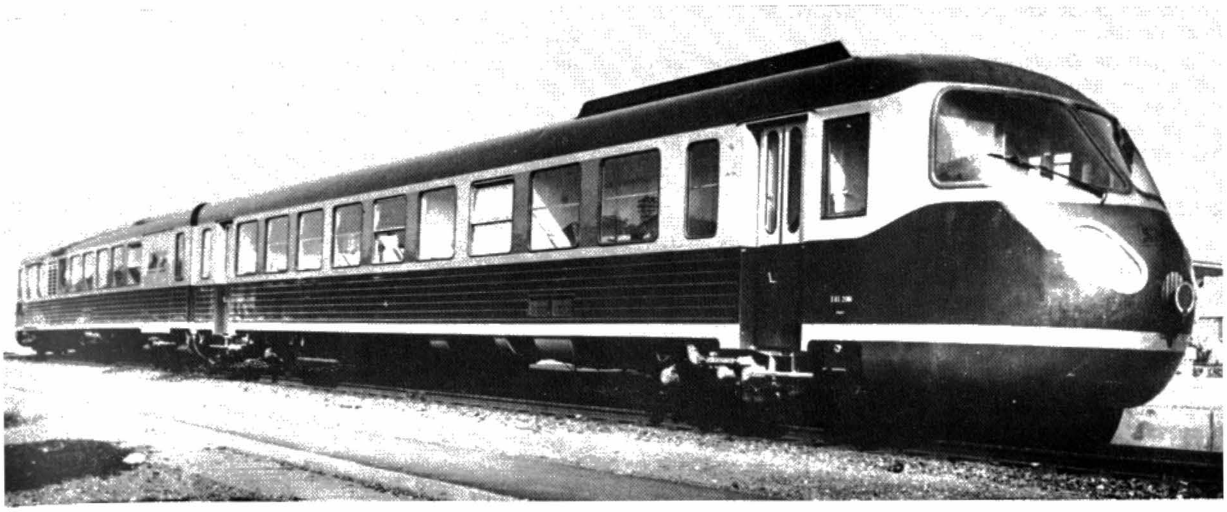


Fig. V-13 — Automoteur turbotrain expérimental ; vitesse maximale : 250 km/h (*S.N.C.F.*)

mise au point de l'aspiration et de l'échappement, de l'indispensable insonorisation et de l'alimentation en combustible diesel, le lancement étant toutefois exécuté au pétrole.

La transmission mécanique, étudiée et construite par la Société Minerva, ne remplit que les fonctions de réduction et d'inversion, le démarrage de la rame ainsi que les évolutions à faible vitesse étant assurés par le diesel qui, par ailleurs, contribue à la traction en vitesse. La vitesse maximale atteinte dès les premiers jours d'essais fut 236 km/h, la puissance massique de l'engin étant de 14,4 kW/t soit : $\frac{330 \text{ kW diesel} + 860 \text{ kW turbine}}{82,6 \text{ t}}$. Le comportement très satisfaisant, tant au point de vue ensemble moteur qu'au point de vue stabilité de marche, motiva la décision de la S.N.C.F. de faire construire dix éléments constitués par une motrice Diesel et une motrice turbine encadrant deux remorques dont une avec restaurant libre-service. L'ensemble de ces quatre caisses a été construit par les Ateliers du Nord de la France, titulaires par ailleurs du marché des éléments automoteurs Diesel ; le montage des turbines et de leur transmission et de leur appareillage était assuré par les ateliers S.N.C.F. du Mans. Cette rame dite E.T.G. (élément automoteur à turbine à gaz) offre 188 places et peut circuler à 180 km/h, une transmission plus évoluée (boîte hydraulique Voith) permettant le démarrage direct sur turbine. En ligne, les réglages de puissance du moteur Diesel et de la turbine se font indépendamment depuis l'une ou l'autre des cabines de conduite situées aux extrémités.

Ces rames assurent depuis février 1970 les dessertes à grande fréquence de circulation de la ligne Paris—Caen—Cherbourg (avec antennes sur Trouville) dans les temps de 1 h 49 pour Paris—Caen et 3 h 04 pour Paris—Cherbourg, la vitesse autorisée étant limitée à 160 km/h.

La S.N.C.F. a étudié une rame à cinq éléments (fig. V-14) formée de deux motrices turbine à gaz encadrant trois remorques, chaque caisse allongée offrant une capacité accrue et l'ensemble étant climatisé. La vitesse maximale de ces rames, destinées à la desserte des transversales Lyon—Nantes, Lyon—Bordeaux et Lyon—Strasbourg, est de 180 km/h. Elle a, par ailleurs, passé commande de deux rames expérimentales, capables de vitesses supérieures à 250 km/h.

Aux États-Unis d'Amérique la firme *United Aircraft* a construit des rames dont cinq exemplaires à sept véhicules (196 t — 140 m — 326 places) ont été commandées par le réseau *Canadian National*, qui les a mis en service entre Montréal et Toronto. Elles sont munies de quatre turbines de 300 kW, la transmission étant mécanique ; la vitesse maximale atteinte est de 200 km/h.

Par ailleurs les *British Railways* ont mis en chantier une rame de huit voitures en alliage léger de moins de 800 t, équipée de quatre turbines Leyland de 270 kW, appelée



Fig. V-14 — Rame automotrice à turbine à gaz (*S.N.C.F.*)

à circuler sur les voies existantes à des vitesses voisines de 200 km/h.

De plus la *Deutsche Bundesbahn* a commandé cinq rames, destinées aux services Trans-Europ-Express qui, équipées de turbines américaines (deux Lycoming K.H.D. et trois General Electric M.T.U.) d'une puissance de 1 600 kW, circuleront à 200 km/h.

3. LES LOCOMOTIVES

3.1. Les locomotives Diesel. — L'exploitation par autorail met en valeur l'incontestable intérêt économique du diesel pour la traction légère.

Dans le domaine de la locomotive, la situation est plus nuancée et il faut distinguer :

— le service des manœuvres, caractérisé par la mise en œuvre de locotracteurs et locomotives de puissances unitaires s'étageant entre 100 et 750 kW ;

— la grande traction, pour laquelle les besoins de l'exploitation imposent des engins moteurs d'une puissance égale ou supérieure à celle des plus puissantes locomotives à vapeur modernes.

La faiblesse du rendement énergétique de la locomotive à vapeur — « cet extravagant consommateur de charbon » disait un ancien président du *Railway Executive* britannique — explique son déclin. Le rendement à la jante d'une locomotive à vapeur, handicapée par surcroît par la présence d'un tender dont l'effet est de diminuer le rapport $\frac{\text{effort au crochet}}{\text{effort à la jante}}$, ne dépasse pas 11 % lorsqu'elle est utilisée dans les conditions de fonctionnement les plus favorables et, il faut le souligner, au prix d'importantes et onéreuses sujétions d'entretien. Le rendement à la jante d'une locomotive Diesel est au moins égal à 25 % (fig. V-15). Cette

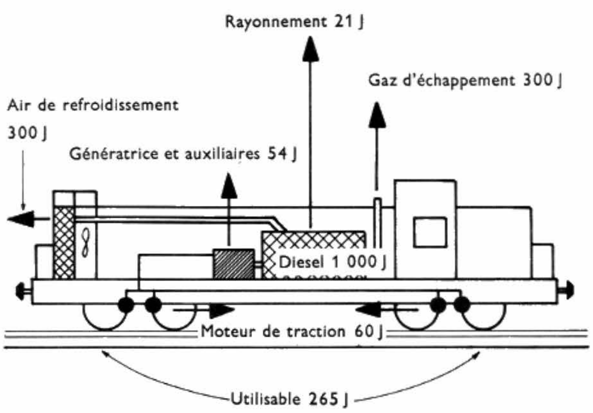


Fig. V-15 — Bilan énergétique d'une locomotive à moteur Diesel (*S.N.C.F.*)

différence s'accuse encore lorsqu'on examine le rendement pratique au crochet tel qu'on peut le déduire des relevés statistiques des tonnages remorqués et de la consommation globale de combustible. La locomotive Diesel est beaucoup moins affectée par les fonctionnements à charge réduite que la locomotive à vapeur laquelle est, par surcroît, grevée de consommations parasites (marche à régulateur fermé, allumage et mise en pression, mise du feu en réserve, disponibilité dans les dépôts) qui représentent une fraction non négligeable de la consommation utile. Il en résulte que le rendement moyen au crochet d'un parc de locomotives à vapeur se situe au-dessous de 5 % contre 20 % pour un parc de locomotives Diesel. L'efficacité de la calorie gasoil est donc quatre fois celle de la calorie charbon et, compte tenu des pouvoirs calorifiques des deux combustibles, un kilogramme de gasoil est susceptible de remplacer 6 kg de charbon. Le bilan économique, dépend évidemment des prix de vente de ces combustibles, prix de vente qui supportent des taxes variables suivant les pays.

Les locotracteurs et locomotives Diesel possèdent une caractéristique commune avec les autorails : la construction autour d'un diesel.

3.1.1. Service de manœuvres. — Les manœuvres sont des mouvements de transport à l'intérieur d'un établissement : gare, mine, usine, etc. Un engin de manœuvre est donc appelé à effectuer une gamme de prestations variées ayant comme caractéristique commune leur faible vitesse et leur courte durée, le rayon d'action étant limité. Mais il arrive fréquemment que l'engin soit appelé à se déplacer d'un établissement à un autre sur des lignes fréquentées, en particulier pour assurer la pleine utilisation de l'engin : celui-ci doit alors être apte à circuler à grande vitesse par ses propres moyens.

Dans une gare de triage, par exemple, il faut assurer le déplacement de rames dont la charge peut aller de 400 t (service léger) jusqu'à 1 600 t (service lourd), le triage étant réalisé soit au lancer (vitesses de 12 à 18 km/h), soit par gravité (vitesse de 4 à 6 km/h) en utilisant des buttes de débranchement. Entre deux opérations se situe un déplacement haut-le-pied qu'il importe d'accomplir avec le minimum de perte de temps (à 40 km/h). De plus, les nécessités du service peuvent requérir le transfert d'une locomotive d'un établissement à un autre, à au moins 60 km/h.

Une seconde particularité des services de manœuvre réside dans le fait que les engins de manœuvre sont appelés à circuler fréquemment sur des voies dont l'armement est léger et l'entretien précaire : les charges par essieu doivent être faibles, cela en opposition directe avec le souci de rechercher un grand poids adhérent.

Une troisième particularité de ce type de service est la faible utilisation moyenne de la puissance installée (20 % en gravité, 25 % au lancer, 50 % en débranchement). Le rendement optimal de l'engin et notamment de sa transmission doit donc être obtenu à charge réduite, sans perdre de vue le rôle déterminant que revêt l'accélération vive des rames déplacées pour assurer un déroulement rapide des opérations.

Indépendamment de l'aspect rendement qui a été évoqué ci-dessus, il faut examiner l'aspect productivité et reconnaître que, là aussi, l'engin diesel est beaucoup plus intéressant que l'engin à vapeur. Le premier, étant affranchi de tous les temps morts pour prise d'eau, décrassage du feu, nettoyage de chaudière, etc., est disponible, en moyenne, 22 heures sur 24 tandis qu'il est difficile de dépasser 15 heures avec le second. Cette productivité est, par surcroît, améliorée par la plus grande rapidité du renversement de sens de marche, la mise à disposition instantanée de l'effort de traction et l'augmentation des accélérations ; ces deux derniers facteurs découlent principalement de la différence des coefficients d'adhérence roue sur rail utilisables : ils sont notoirement plus grand en diesel du fait de la valeur uniforme du couple moteur au cours d'une rotation de roue motrice, situation beaucoup plus favorable à des accélérations vigoureuses que l'allure pulsatoire du couple d'une locomotive à vapeur.

Tandis que les dépenses d'entretien rapportées à l'heure de manœuvre sont abaissées de 25 %, la régularité du débranchement qui permet une cadence moyenne beaucoup plus grande, et la suppression de tout temps mort (prises d'eau de la locomotive à vapeur) au cours du travail font que le nombre de périodes de manœuvres nécessaires pour un trafic déterminé peut être abaissé de 20 à 25 % ; cela permet une réduction corrélative des effectifs « agents » de l'Exploitation.

Au total quatre locomotives Diesel de 450 kW (puissance fournie sur l'arbre du diesel) consommant chacune 30 kg de gas-oil à l'heure et conduites chacune par un seul agent peuvent, en service de manœuvre, remplacer 7 locomotives à vapeur de 1 000 kW à la jante consommant chacune 400 kg de charbon à l'heure et conduites chacune par deux agents.

Il faut reconnaître que les locomotives à vapeur de moindre puissance étaient fréquemment conduites par un seul agent ; ces dernières ont été remplacées par les locotracteurs.

1° *Les locotracteurs.* — Engins de faible puissance et de faible masse, en général pourvus de deux essieux,

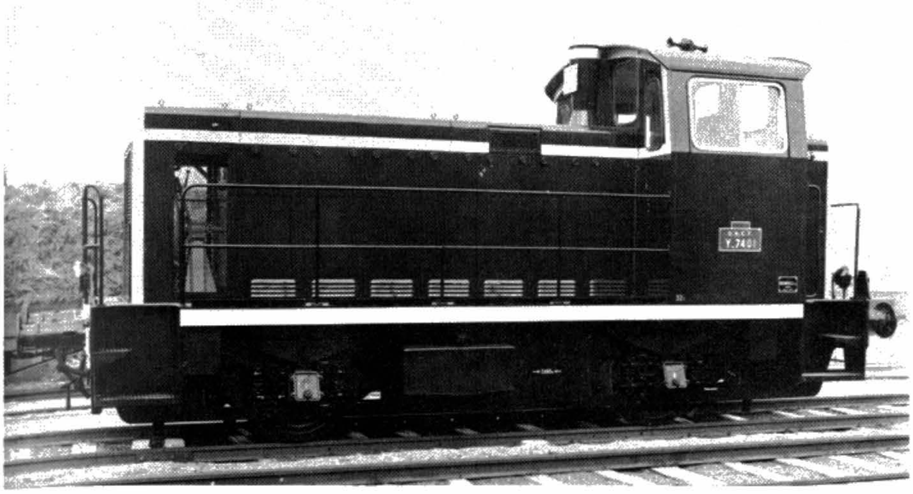


Fig. V-16

Locotracteur
longueur : 9 m ;
masse en ordre de marche : 32 t ;
effort à la jante au démarrage :
7 700 daN ;
vitesse maximale : 60 km/h
(*S.N.C.F.*)

tous deux moteurs, les locotracteurs constituent, en fait, les premiers engins ferroviaires à moteur thermique, les premières fabrications étant apparues durant la première décennie de ce siècle (ils étaient, alors, équipés de moteurs à essence).

Les manœuvres de wagons isolés ou de petites rames étaient alors assurées, le plus fréquemment, soit par des chevaux (avec conducteur attitré), soit par les locomotives des trains de passage, solution qui entraînait des retards plus ou moins importants, obérant la régularité et même la sécurité et occasionnant, en chaîne, des dépenses supplémentaires de personnel et de combustible. Le locotracteur fut, dès son apparition, très apprécié, les économies directes qu'il permettait de réaliser atteignant fréquemment 40 % (amortissement de l'engin compris) malgré le coût élevé de l'essence.

Multiples sont, dans le temps et dans l'espace, les types de locotracteurs.

La France est certainement l'un des pays où ces engins sont les plus répandus et la S.N.C.F. est vraisemblablement l'utilisateur qui possède le plus grand nombre de locotracteurs de même type (plus d'un millier), le locotracteur étant par définition un engin léger de puissance inférieure à 220 kW (300 ch), caractérisé par sa robustesse et sa simplicité.

Les locotracteurs unifiés S.N.C.F. (fig. V-16) dont la construction débuta en 1941 et dont les dernières commandes ont été livrées en 1972, possèdent le même châssis, le même train de roues, le même poste de conduite et le même diesel, un 6 cylindres Poyaud non suralimenté, tournant à 1 500 tr/mn, dont la puissance nominale fut progressivement portée de 118 kW (1949) à 152 kW (à partir de 1963). La seule différence notable réside dans la transmission de puissance ; d'abord électrique Oerlikon (363 engins de 1949 à 1958), puis hydraulique Voith (209 engins de 1958 à 1962), puis mécanique Asynchro-Minerva (488 engins de 1963 à 1972).

Ces locotracteurs assurent tous les services de gare, de nombreuses dessertes d'embranchements et la remorque de trains locaux pouvant aller jusqu'à 600 t en palier. Leur conduite particulièrement simple peut être confiée à des agents non spécialisés du service de l'Exploitation.

La construction de la partie mécanique et le montage ont été assurés au cours des temps par différents constructeurs parmi lesquels De Dietrich et Moyse continuent cette fabrication.

La S.N.C.F. fit construire entre 1952 et 1960 des locotracteurs de faible puissance à transmission mécanique, équipés soit de diesels Poyaud 2 cylindres (44 kW, 120 unités) soit de diesels à refroidissement par air Agrom (6 cylindres, 44 kW à 1 800 tr/mn, 120 unités) affectés au service de petites gares mais dont la vitesse maximale est néanmoins de 50 km/h.

Elle dispose également de quelques dizaines d'engins de puissance supérieure (diesels Renault ou Saurer de 300 kW) à transmission hydraulique Voith dénommés locomoteurs, construits entre 1953 et 1960 et qui sont intermédiaires entre le locotracteur et la locomotive proprement dite.

2° *Les locomotives de manœuvres.* — Avant la guerre de 1939-1945, des prototypes disparates de locomotives de manœuvres, équipées de diesels lourds du type sous-marin, tournant à 600 tr/mn et dont la puissance ne dépassait guère 500 kW, avaient permis de mesurer à quel point ce mode de traction surclassait la locomotive à vapeur dans le domaine des manœuvres.

L'unification des types s'était amorcée à la S.N.C.F. avec la livraison, en 1938, de locomotives BB de 68 t, capables de 50 km/h, équipées de diesels à 6 cylindres en ligne Sulzer de 405 kW à 695 tr/mn (fig. V-17).

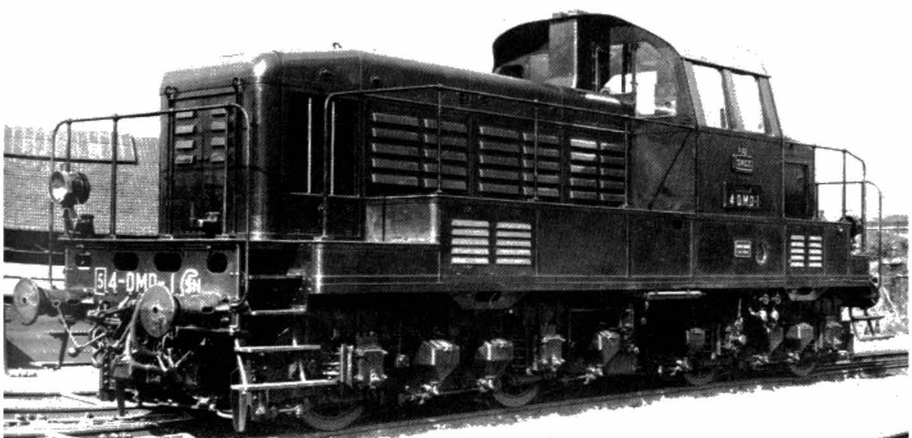


Fig. V-17

Locomotive 040 DD
(ex-4 DMD)
(*S.N.C.F.*)



Fig. V-18

Locomotive V60
de la Deutsche Bundesbahn;
longueur: 10,5 m;
masse en ordre de marche: 50 t;
vitesse maximale: 60 km/h;
efforts de traction au démarrage:
17 000 daN
(*S.N.C.F.*)

Après la guerre, la S.N.C.F. mit en service, dès 1946, 100 locomotives de 550 kW, importées d'Amérique, et elle s'équipa de locomotives de 375 kW spécialement affectées au service de manœuvres lourdes, engins possédant une adhérence de 105 t grâce à l'adjonction d'un *truck*, ensemble de six essieux biellés qui confère à ces engins de remarquables qualités manœuvrières.

Par la suite, l'intérêt se porta vers des locomotives dites mixtes (telles les *road-switchers* américaines), capables d'assurer tant le service de manœuvres pures que la desserte de lignes secondaires. Les locomotives 63000 à transmission électrique de la S.N.C.F. et les V 60 à transmission hydraulique de la Deutsche Bundesbahn (fig. V-18) constituent les types les plus marquants de locomotives de ce genre. Toutes deux construites en grande série (plus de 1 000 exemplaires pour chacune d'elles, compte tenu des engins exportés), constituent les têtes de file des deux grandes options prises dans le domaine des transmissions de locomotives diesel, à savoir l'électrique et l'hydraulique.

La charge maximale par essieu des locomotives 63000 a été limitée à 17 t en raison de l'armement souvent léger des petites lignes; la présence de 2 bogies facilite l'inscription en courbe. Ces engins, étant appelés à desservir des lignes éloignées des centres d'entretien, furent réalisés simplement avec des organes aussi accessibles que possible, tous les auxiliaires étant entraînés mécaniquement par le diesel.

Ces locomotives comportent deux régimes de fonctionnement (fig. V-19):

— le régime « ligne » qui donne des accélérations rapides ($15{,}5 \times 10^3$ daN au démarrage) et réalise les conditions les plus économiques d'utilisation du diesel (fig. V-20), la vitesse maximale étant de 80 km/h;

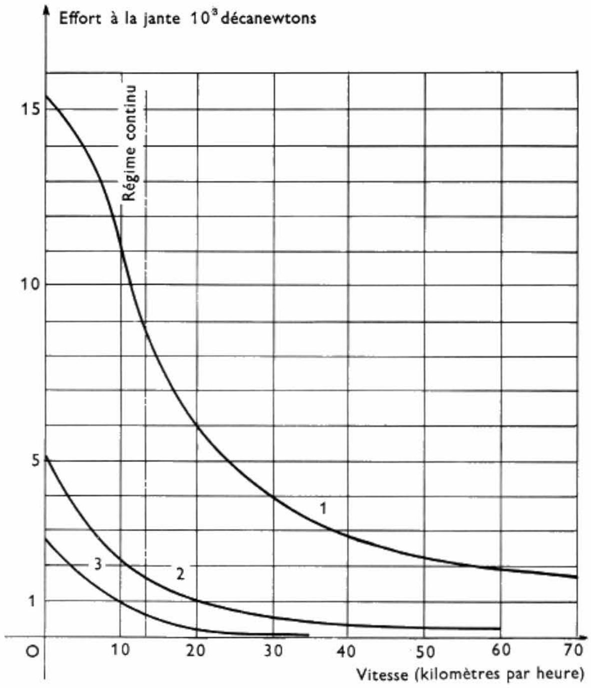


Fig. V-19 — Effort à la jante en fonction de la vitesse: 1: à pleine injection du diesel; 2: au ralenti, régime de ligne; 3: au ralenti, régime de butte

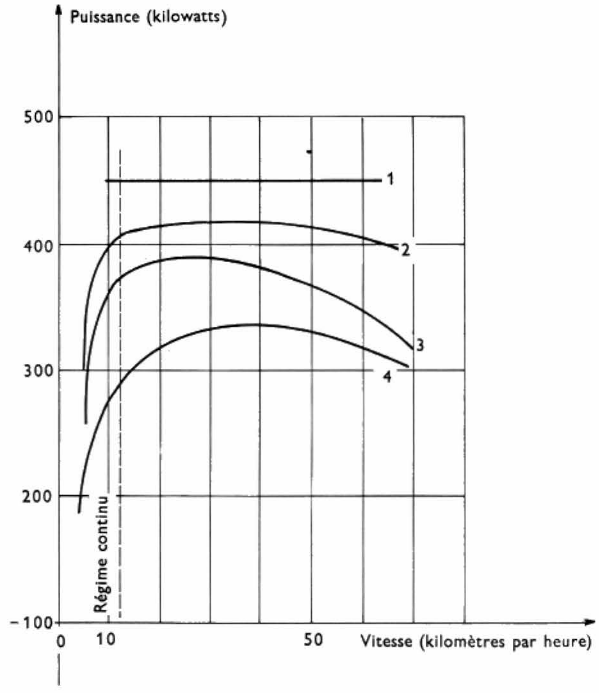


Fig. V-20 — Puissances en fonction de la vitesse: 1: fournie par le diesel; 2: absorbée par la génératrice principale; 3: aux bornes des moteurs de traction, à la jante



Fig. V-21

Locomotive P.L.M. 262 BD de grande vitesse (130 km/h) mise en service en 1935 (*S.N.C.F.*)

— le régime « butte » avec lequel on dispose d'efforts très progressifs pour débrancher à faible vitesse des rames de tonnage variable en utilisant les caractéristiques naturelles de la transmission électrique.

La locomotive 63000 constitue un exemple particulièrement frappant de l'évolution des moteurs diesel au cours de la décennie 1950-1960. Les premières de ces locomotives, sorties en 1953, étaient équipées d'un diesel semi-lent (Sulzer 6 cylindres en ligne suralimentés, de 220 mm d'alésage, développant 440 kW à 900 tr/mn) ; en 1956 quelques-unes furent munies d'un diesel rapide (le M.G.O. 12 cylindres en V suralimentés, de 175 mm d'alésage, développant 605 kW à 1 500 tr/mn), tandis que la puissance des moteurs d'origine était portée à 535 kW à 950 tr/mn. D'une part le prix d'achat (compte tenu de l'influence de la vitesse de rotation sur l'importance de la génératrice principale), d'autre part, les conditions d'entretien et les frais de révision, firent apparaître la meilleure rentabilité du moteur rapide d'une façon tellement nette que, dès 1962, les locomotives commandées furent toutes équipées avec des moteurs rapides bien que la puissance des moteurs semi-lents ait été, après améliorations technologiques, portée à 550 kW. À ce propos, on notera que le moteur M.G.O. choisi est le même que celui équipant les autorails. Au total la S.N.C.F. possède 853 locomotives 63000 dont 250 à diesel semi-lent (livrées entre 1953 et 1964) et 603 à diesel rapide (livrées entre 1956 et 1971). La construction de ces locomotives a été assurée par Brissonneau et Lotz qui a fourni également leur équipement électrique de traction.

Les locomotives V 60 de la D.B. équipées d'emblée avec un diesel rapide de 475 kW, locomotives à 3 essieux biellés (comme les premières locomotives strictement de manœuvre de la S.N.C.F.), relativement légères (16 t par essieu, pouvant être lestée pour 18 t), à vitesse maximale de 60 km/h sont plus spécialement affectées au service de manœuvres.

3.1.2. Service de ligne. — Dans ce domaine, malgré les marches à régime soutenu qui diminuent la marge économique que présente le diesel, l'avantage de la locomotive à vapeur s'amenuise. En effet, d'une part le montant de son poste « entretien » s'accroît avec les perfectionnements destinés à améliorer son rendement énergétique et, d'autre part, le prix d'achat du diesel puissant s'abaisse par la standardisation et la fabrication en série. L'industrie américaine fut, là aussi, en avance sur l'industrie européenne puisqu'aux États-Unis d'Amérique des diesels de 320 mm d'alésage étaient construits en série dès avant la guerre. Par ailleurs, l'armement des voies et le gabarit américain permettent l'adoption de solutions plus lourdes, donc, à puissance égale, moins fouillées que celles auxquelles sont assujettis les constructeurs européens en même temps que la locomotive à vapeur connaît dans le Far-West semi-désertique des conditions d'exploitation particulièrement onéreuses.

La première locomotive mise en service commercial régulier le fut, en 1928, par le *Canadian National Railway ;* constituée de deux unités 2-D-1, d'une masse totale de 294 t, elle était équipée de 2 diesels Beardmore-Westinghouse développant chacun 1 000 kW à 800 tr/mn. Elle pouvait atteindre la vitesse de 105 km/h.

En 1933 les *Chemins de Fer Argentins*, qui avaient antérieurement expérimenté des « centrales roulantes » alimentant des moteurs de traction disposés sur les voitures remorquées, mirent en service une locomotive Diesel électrique de 1 250 kW (en deux unités Sulzer tournant à 550 tr/mn) ; d'une masse de 145 t, elle pouvait atteindre 112 km/h.

En 1936, le célèbre « Super Chief », le train transcontinental de l'Atchison, Topeka et Santa Fé, était remorqué par une locomotive diesel de 2 700 kW, en deux unités, sur les 3 600 km séparant Chicago de Los Angeles. Malgré un profil très accidenté — la ligne franchit les Montagnes Rocheuses à 2 350 m d'altitude et parcourt durant 1 300 km un relief montagneux avec de gigantesques dents de scie — le parcours était effectué en 41 heures 45 minutes, soit à la remarquable moyenne commerciale de 87 km/h.

En 1935, le réseau français P.L.M. avait ouvert un concours pour la fourniture de deux locomotives Diesel aptes à effectuer le parcours Paris—Menton à 100 km/h de moyenne sans ravitaillement et aptes à développer, dans des conditions déterminées de masse (18 t par essieu) et d'encombrement, les puissances nécessaires à la remorque de trains de 450 t. En outre, ces locomotives devaient pouvoir parcourir 250 000 km pendant chacune des deux années suivant la mise au point après livraison. On était donc amené à prévoir une puissance diesel de 3 000 kW ; la puissance maximale de chaque cylindre de diesel 4 temps suralimenté étant, à l'époque, voisine de 120 kW, il fallait installer 24 cylindres. Les deux locomotives, construites l'une par Fives Lille avec 4 diesels M.A.N. 6 cylindres, l'autre par Marine-Homécourt avec 2 diesels Sulzer 12 cylindres, étaient constituées de deux éléments, avec disposition d'essieux identiques $(2—C_0—2)+(2—C_0—2)$; leur masse était respectivement de 225 et 228 t (fig. V-21). À la même époque une locomotive analogue était livrée par Sulzer aux chemins de fer roumains.

Au début de la guerre 1939-1945 les Chemins de fer s'étaient donc bornés à expérimenter le nouveau mode de traction sans se lancer dans des applications systématiques étendues.

En réalité, le trafic diesel de ligne est né aux États-Unis d'Amérique en 1942 lorsqu'il fallut faire face aux transports militaires massifs vers la côte du Pacifique (à la suite de l'attaque de Pearl Harbour) ; la traction diesel prit alors un essor rapide, les charges des trains américains (3 000 t et

au-delà) et le profil des lignes exigeant l'utilisation en unités multiples, tant pour l'adhérence que pour la vitesse.

Quatre constructeurs, *General Motors, American Locomotive Company* (Alco), *Baldwin* et *Fairbanks-Morse* se partagèrent l'énorme marché américain, la General Motors prenant d'emblée la part du lion (plus de 60 %) avec des locomotives équipées d'un (ou deux) diesel 2 temps à 12 ou 16 cylindres en V développant 85 kW par cylindre à 835 tr/mn (fig. V-22). Tandis qu'Alco et Baldwin utilisaient leurs diesels 4 temps suralimentés, Fairbanks-Morse adoptait un 2 temps à pistons opposés avec double vilebrequin. Tous choisissaient la transmission électrique à courant continu avec moteurs de traction suspendus par le nez. Chacun des quatre constructeurs présentait une gamme de locomotives, toujours à charge par essieu élevée, en versions s'étageant depuis la BB de 80 t jusqu'à la 2 DD 2 de 258 t (pour Baldwin) en passant par la CC et la A 1 A-A 1 A, avec des puissances s'échelonnant de 1 000 à 2 200 kW par unité et des vitesses maximales culminant, pour certains modèles, à 190 km/h. Chacun poussait la standardisation à un point tel que le client devait accepter le modèle normalisé par la firme sans pouvoir y apporter de modification autre que la décoration extérieure, généralement à couleurs vives. Cette normalisation allait de soi, non seulement dans l'optique de la fabrication en série mais aussi du fait des conditions de financement offertes aux réseaux américains, auxquels les locomotives sont affermées, en régime de location-vente, à des taux très bas. L'uniformité des modèles constitue l'une des données fondamentales du financement, la valeur vénale des locomotives se conservant en cas de mutation d'un réseau à l'autre en fonction de l'évolution du trafic.

Ces conditions de financement imposaient aux constructeurs de s'assurer de la qualité des approvisionnements nécessaires au service des locomotives ainsi que des conditions d'entretien des engins, fonctions qui étaient précédemment du ressort exclusif des réseaux.

Suivant cet exemple, le Canada, le Mexique, l'Amérique du Sud et l'Australie, puis plus récemment l'Inde développèrent l'emploi de la traction diesel avec des locomotives construites sous licence ou importées des États-Unis d'Amérique.

Après 1945, les réseaux européens situés dans un cadre géographique différent, tant sur le plan physique que sur le plan humain, développèrent par priorité la traction électrique. Toute comparaison objective entre les trois modes de traction de grandes lignes ne peut être que très nuancée. En cas de conversion de la traction vapeur à la traction diesel les dépenses d'installations nouvelles sont pratiquement inexistantes et le prix d'acquisition du parc de locomotives ainsi que les dépenses annuelles d'exploitation sont sensiblement proportionnelles au trafic ; les courbes représentant les dépenses annuelles sont donc des droites partant de l'origine. Celle pour la vapeur étant toujours plus inclinée que celle du diesel, ce dernier est donc plus rentable. En traction électrique les dépenses proportionnelles au trafic sont inférieures à celles du diesel ; la droite est donc encore moins inclinée mais elle ne part pas de l'origine du fait des dépenses d'installations fixes, sensiblement proportionnelles à la longueur de la ligne (fig. V-23). Il existe donc un trafic annuel par kilomètre de

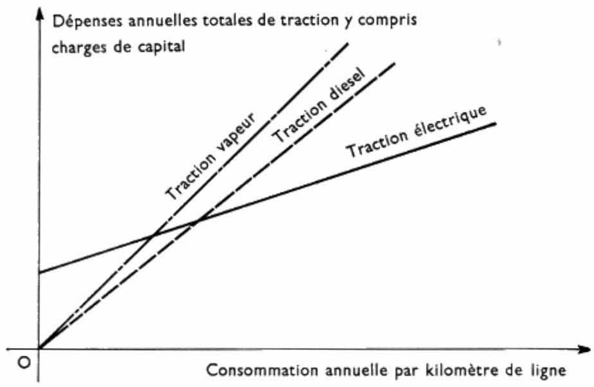


Fig. V-23 — Seuils de rentabilité

ligne au-delà duquel la traction électrique est plus rentable que la traction diesel. Ce trafic critique varie avec la géo-

Fig. V-22 — Locomotive General Motors ; effort de traction au démarrage : 30 000 daN ; vitesse : 140 km/h (*J. Lofman*)



graphie et l'économie des pays desservis. Ainsi en 1951 l'Institut américain des ingénieurs électriciens signalait que les dépenses d'énergie par 736 kWh s'établissaient ainsi en dollars:

Traction	États-Unis d'Amérique	Europe
Diesel	0,80	1,43
Électrique	1,06	0,67

Mais au sein de l'Europe elle-même des différences notables existaient, lesquelles d'ailleurs se modifiaient dans le temps. Ainsi en économie française le seuil entre traction diesel et traction électrique se situait en 1964 à environ 175 kWh/km.an.

Mais il faut noter:

— que la S.N.C.F., du fait de son réseau maillé, est un excellent client pour É.D.F. qui apprécie la régularité des appels de puissance;

— que l'autonomie de la locomotive diesel permet, mieux encore que la locomotive à vapeur, de déplacer un contingent d'engins de traction lors de pointes saisonnières de trafic;

— que le rendement du diesel se répercute profondément sur le prix de revient traction dans les contrées, telles celles en cours de développement, dans lesquelles de longues lignes de pénétration ne peuvent être ravitaillées en combustible que par une de leurs extrémités (fig. V-24).

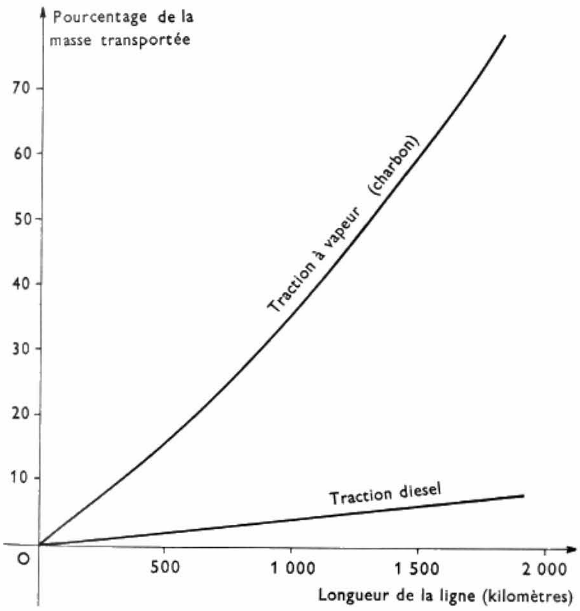


Fig. V-24 — Transport du combustible nécessaire à la traction

À cet avantage direct, s'ajoute l'intérêt de la libération (ou de la non construction) d'une quantité non négligeable de l'effectif wagons. Ainsi sur le réseau de 1 250 km du Dakar-Niger, un train sur quatre transportait naguère le charbon destiné au ravitaillement des dépôts de l'intérieur alors qu'une locomotive Diesel emporte maintenant, dans de nombreux cas, le combustible qui lui est nécessaire pour le retour. L'alimentation en eau pose fréquemment des problèmes ardus, soit du fait de la pénurie, soit du fait de la qualité: ce problème disparaît avec le diesel;

— que si les rapports des effectifs locomotives et des consommations sont, dans le service de ligne, moins favorables au diesel que dans le service de manœuvre, on peut néanmoins tabler sur deux faits: d'une part, en moyenne, 15 locomotives diesel remplacent 25 locomotives à vapeur et, d'autre part, la remorque de 1 000 t kilométriques brutes requiert 6,5 kg de gasoil contre 40 kg de charbon.

Le développement de la locomotive diesel en Europe est pénalisé par l'étroitesse des marchés et la dispersion de l'industrie. Des efforts louables furent tentés vers 1950 pour aboutir à la standardisation de quelques types de locomotives et d'organes communs dont la fabrication en série eût été réalisée par quelques industriels bien outillés. Le résultat fut mince mais il est objectif de reconnaître que la rapide évolution de la technique ne permettait pas de définir des types standards: les performances étaient surclassées par d'autres engins avant même que les prototypes à standardiser aient été éprouvés. L'évolution de la technique européenne était d'autant plus ardente que les locomotives européennes, dont les charges par essieu ne doivent pas dépasser 20 t et souvent même 18, ont besoin d'une puissance massique nettement plus élevée que les locomotives américaines et que la solution américaine de la marche en unités multiples modifie le seuil de rentabilité électrique-diesel au détriment du diesel, la puissance des locomotives électriques n'étant pas limitée à celle d'une centrale ambulante.

L'évolution des locomotives diesel des pays européens suivit celle des moteurs Diesel nationaux.

Aussi en France la S.N.C.F. mit en service durant les années 1955 à 1959 deux types de locomotives de ligne, toutes deux à transmission électrique:

— 35 CC de 123 t construites par les Ateliers et Forges de la Loire, équipées avec un diesel Sulzer 12 cylindres développant 1 470 kW à 710 tr/mn, destinées au service de la grande ceinture de Paris, ligne à fortes rampes parcourue par des trains lourds. La vitesse de ces locomotives pour trains de marchandises était limitée à 75 km/h (fig. V-25).

— 20 CC de 112 t construites par Alsthom, équipées avec deux moteurs M.G.O. 12 cylindres, un peu plus perfectionnés que ceux équipant les 63000 de manœuvres et développant 670 kW chacun. Ces locomotives assurent toujours la desserte de la ligne Nantes-Bordeaux et de ses affluentes.

En 1960 débuta la série des locomotives 66000 BB de 72 t, construites sous l'égide d'Alsthom par un groupement de constructeurs mécaniciens (C.A.F.L., Fives-Lille) et électricien (C.E.M.); ces locomotives équipées, sauf 15

Fig. V-25 — Locomotive 65500 (ex- 64000); effort à la jante au démarrage: 36 000 daN (*S.N.C.F.*)



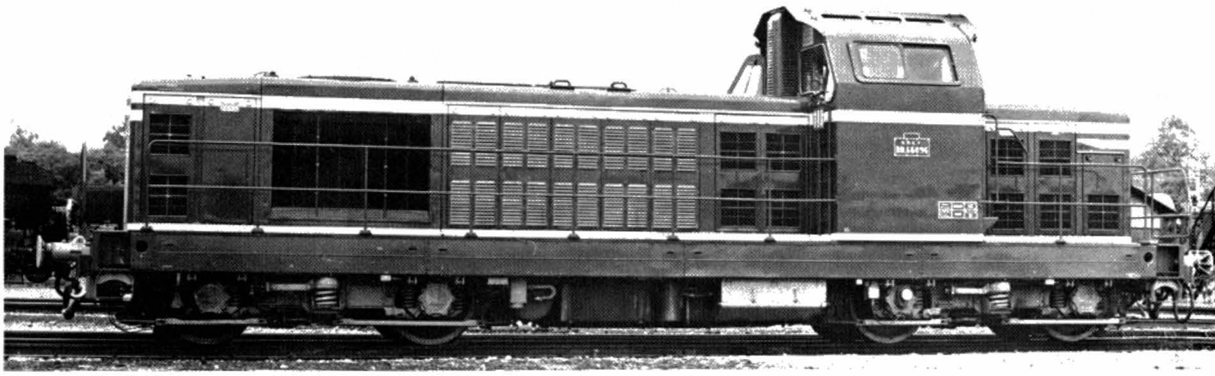


Fig. V-26 — Locomotive 66000; longueur: 14,9 m; vitesse maximale: 120 km/h; effort de traction au démarrage: 19 600 daN (*S.N.C.F.*)

d'entre elles, avec un diesel M.G.O. 16 cylindres suralimentés de 1 030 kW à 1 500 tr/mn, de vitesse maximale 105 km/h (qui fut, par la suite, portée à 120), étaient destinées aux services voyageurs et marchandises des lignes secondaires de quelque importance (fig. V-26). À vrai dire, cet engin avec sa cabine unique et son capot s'apparente plus à la classe des machines mixtes (manœuvres-ligne) qu'à la locomotive de ligne. Le nombre d'engins en service à la date du 1er janvier 1971 était de 436. On notera qu'à partir de 1966, la génératrice à courant continu fut remplacée par un alternateur avec groupe de redresseurs, solution qui, outre les avantages de simplicité, de faible encombrement et de rendement, présente l'intérêt de permettre le chauffage électrique des trains.

À dater de 1960, plusieurs constructeurs français furent aptes à fournir des diesels d'alésages importants (185 à 240 mm), à haute suralimentation (2 bars effectifs), rapides (10 m/s de vitesse moyenne de piston) et puissants (pressions moyennes effectives 15 bars, puissances par litre de cylindrée ⩾ 15 kW, puissance par cylindre ⩾ 145 kW). La S.N.C.F. pouvait donc envisager la mise en service de locomotives de grande traction sur des lignes relativement importantes mais dont le trafic global ne justifiait pas l'électrification, telles Paris—Bâle, Paris—Cherbourg, Rennes—Brest, Le Mans—Nantes—Quimper, Bordeaux—Montauban, Paris—Clermont-Ferrand, Lyon—Grenoble—Chambéry. Ainsi naquirent:

— Les 67000 BB de 80 t à diesel S.E.M.T.-Pielstick type PA 4, 16 cylindres en V développant 1 750 kW à 1 500 tr/mn, légers (5 kg/kW), munies d'un bogie monomoteur dérivé de ceux équipant les locomotives électriques série 9 400 comportant deux rapports de démultiplication (85 et 130 km/h). L'obligation de ne pas dépasser 20 t par essieu ne permit pas l'installation à bord de l'équipement assurant le chauffage des trains par la vapeur. Cette série de locomotives, construites par le groupement Brissonneau et Lotz - Matériel de Traction Électrique (M.T.E.), comprend 332 unités dont les 209 dernières sont équipées d'alternateurs avec groupe redresseurs permettant d'assurer le chauffage électrique des trains.

— Les 68000 A1A-A1A de 104 t en ordre de marche, à diesel Sulzer à 12 cylindres en V développant 1 985 kW à 1 050 tr/mn (80 locomotives) ou à diesel A.G.O. de la Société alsacienne de constructions mécaniques Mulhouse développant 1 985 kW à 1 350 tr/mn (29 locomotives) (fig. V-27).

Ces locomotives sont construites par la *Compagnie des Ateliers et Forges de la Loire ;* l'équipement électrique est fourni par la Compagnie Électro-Mécanique.

Pour cet engin, 6 essieux s'avéraient nécessaires mais,

Fig. V-27 — Locomotive 68000; vitesse maximale: 130 km/h; effort de traction au démarrage: 28 400 daN (*S.N.C.F.*)





Fig. V-28

Locomotive 72000
Vitesse maximale:
160 km/h en régime « voyageurs »
85 km/h en régime
« marchandises »
(*S.N.C.F.*)

en raison des progrès réalisés dans l'utilisation de l'adhérence au démarrage, 4 essieux moteurs furent jugés suffisants, ce qui conduisit à l'agencement A1A-A1A qui offrait la possibilité d'installer une chaudière de chauffage (avec 4 700 l d'eau).

Les moteurs électriques sont du type « semi-suspendu » et les bogies conçus pour réduire les déchargements d'essieux dus au cabrage.

Ces deux types de locomotives comportent de nombreux organes identiques (cabines de conduite, groupes de refroidissement, compresseurs, etc.) et le système de commande, unifié, permet la marche en unités doubles de deux locomotives quelconques.

En 1964 et 1965, la S.N.C.F. mit en service deux types de locomotives à grande puissance, construites chacune à deux exemplaires, toutes deux équipées des deux diesels 16 PA 4:

— Les 69000 BB de 84 t à transmission hydraulique.

— Les 70000 CC de 117 t dans lesquelles les deux moteurs actionnent un alternateur dont l'induit et l'inducteur tournent l'un et l'autre mais en sens contraire, leur vitesse relative étant de 3 000 tr/mn.

Ces prototypes n'eurent pas de suite, car les progrès réalisés dans la conception des diesels permirent de mettre en service en 1967 les locomotives 72000, équipées d'un seul moteur Diesel de 2 650 kW, le 16 cylindres en V A.G.O. (fig. V-28). Cette locomotive, CC de 114 t, prévue pour une vitesse de 160 km/h est équipée d'une transmission électrique triphasé-continu; sa puissance peut être portée à 2 950 kW. Les bogies monomoteurs du type de ceux des locomotives électriques à double réduction d'engrenages (85 et 140 km/h) permettent d'obtenir au démarrage un effort à la jante de 35 000 daN. La transmission triphasé-continu permet le chauffage électrique des trains les plus lourds en courant redressé sous 1 500 V. Ces locomotives, construites par Alsthom qui fournit également tout l'équipement électrique, ne peuvent pas fonctionner en unités multiples; 74 locomotives de ce type sont en service.

La S.N.C.F. dispose ainsi d'un parc de 500 locomotives de grande traction lui permettant de couvrir les demandes de trains de toute nature.

L'industrie française a exporté (et continue d'exporter) dans le monde entier plusieurs centaines de locomotives diesel de types s'inspirant plus ou moins des types 63, 66, 67 et 72000. D'autres types ont été réalisés en fonction d'applications très spéciales; parmi ceux-ci il faut noter:

— Les 16 CC Alsthom de 126 t équipées avec 2 diesels M.G.O. 16 cylindres qui, en Mauritanie, couplées par trois, remorquent sur 650 km des trains de 14 000 t évacuant le minerai de fer du gisement saharien de Fort-Gouraud, trains dont le démarrage requiert un effort au crochet de 95×10^3 daN (fig. V-29). La faible consommation de combustible des diesels (218 g par kWh) fut un élément déterminant de la décision prise en faveur de ces engins, la consommation en ligne s'abaissant au voisinage de 2 grammes par tonne et par kilomètre remorqués.

Deux particularités répondent aux conditions climatiques:

— l'installation de refroidissement est prévue pour une température ambiante de 55 °C et la cabine de conduite est à air conditionné;

— la filtration de l'air doit tenir compte de terribles vents de sable, le débit d'air filtré étant de 20 m³/s.

Ces locomotives, capables d'une vitesse de 70 km/h, sont munies d'un freinage rhéostatique de ralentissement dont la puissance par locomotive atteint 2 400 kW.

— Les nouvelles BB-BB de 128 t du Congo-Océan, équipées d'un seul diesel A.G.O., 16 cylindres, réglé à 2 450 kW, locomotives construites par la Compagnie Électro-Mécanique avec le concours de la Compagnie des Aciéries et Forges de la Loire. Les quatre bogies monomoteurs du type B, groupés en duo avec double articulation d'une conception entièrement nouvelle, ont permis de souscrire aux impératifs: grande puissance, écartement des rails de 1,067 m, charge par essieu limitée à 16 t, inscription en courbe de 50 m. Ces locomotives, dont la



Fig. V-29 — Train en gare de F'Derik (*S.A. des Mines de fer de Mauritanie*)

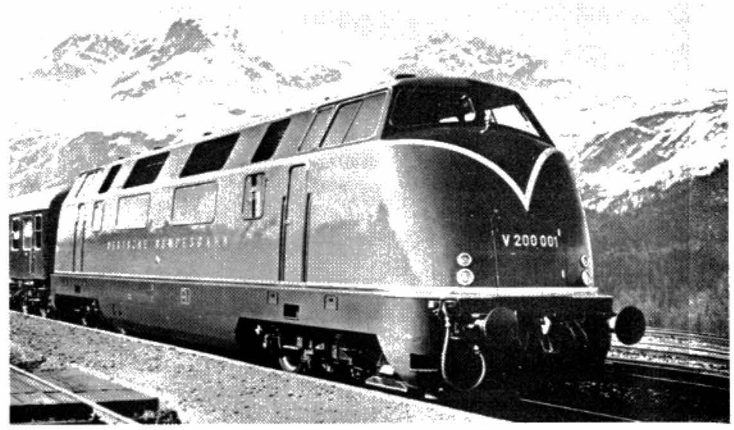


Fig. V-30

Locomotive Diesel à transmission hydraulique de la Deutsche Bundesbahn; longueur: 18,5 m; masse en ordre de marche: 81 t; effort de traction au démarrage: 24 000 daN (*Mercedes-Benz*)

vitesse maximale est de 80 km/h, permettent d'appliquer un effort maximal à la jante de 50 × 10^3 daN et sont munies d'un freinage rhéostatique, appelées qu'elles sont à déplacer des rames de 1 100 t dans des rampes et déclivités de 22 °/₀₀.

Les Chemins de Fer de la République Fédérale Allemande (D.B.) ont débuté la diesélisation de leurs grandes artères plus tôt que la S.N.C.F. en mettant en service des locomotives équipées systématiquement de transmissions hydrauliques. Les premières, avec leurs diesels rapides, s'apparentaient aux locomotives françaises de ligne Nantes—Bordeaux; comme pour les autorails, trois types interchangeables de diesels, développant 800 kW à 1 500 tr/mn, furent retenus. La vitesse maximale de ces locomotives BB V 200 est de 140 km/h (fig. V-30). Concurremment la D.B. mettait en service un nombre important de BB type V 100, équivalentes aux 66000 françaises, locomotives BB à capot et cabine centrale, équipées de diesels rapides de 800 ou 1 000 kW, à transmission hydraulique, et capables de 120 km/h.

À partir de 1960, la D.B. mit en service des locomotives de ligne (140 km/h), type V 160, toujours à transmission hydraulique mais avec un seul diesel de 16 cylindres en V développant 1 400 kW puis des CC V 320 équipées avec deux diesels. En 1969 elle a expérimenté sur dix locomotives l'adoption d'un moteur M.A.N., de 230 mm d'alésage, développant 1 800 kW à 1 500 tr/mn en version 12 cylindres, ces locomotives constituent donc les homologues des 68000 de la S.N.C.F.

À l'inverse de la S.N.C.F. et de la D.B. qui débutèrent tôt leur diesélisation et la développèrent lentement, les British Railways commencèrent tardivement et accomplirent en quelques années leur diesélisation; à l'heure actuelle, mis à part le Danemark, il semble qu'ils soient le réseau européen où la part de trafic diesel est le plus important. Le plan de modernisation prévoyait, en effet, un programme de 2 500 locomotives de grande ligne de types d'ailleurs disparates: la première fut livrée au début 1957, la millième fut mise en service en juin 1961. Le rythme élevé de cette conversion fut responsable de déconvenues. Au point de vue technologique, les locomotives diesel anglaises ne présentent pas de particularités notables, mises à part les locomotives équipées avec 1 ou 2 diesels 2 temps Napier-Deltic à 6 tranches de 3 cylindres en triangle et pistons opposés développant 1 215 kW à 1 500 tr/mn (fig. V-31), moteurs qui se caractérisent par une puissance massique élevée et une technologie très évoluée.

Les autres pays ont mis en service et continuent à mettre en service des locomotives diesel s'apparentant aux types courants évoqués ci-dessus. En général, ces locomotives sont, plus ou moins totalement, soit importées, soit construites sous licence.

Néanmoins quelques constructeurs de moteurs diesel européens ont mis au point des moteurs rapides de leur conception et en équipent des locomotives; parmi ceux-ci, il faut mentionner Simmering en Autriche, Cockerill Ougrée en Belgique, Fiat en Italie, Werkspoor aux Pays-Bas, C.K.D. en Tchécoslovaquie. Le nombre de locomotives construites par ce dernier est considérable, la cadence hebdomadaire de fabrication atteignant 10 unités, pour la plupart du type manœuvre-ligne à vitesse maximale modeste.

À la date du 1er janvier 1969 la situation générale de la traction diesel de ligne et de manœuvre apparaissait comme l'indique le tableau page 131 en se limitant aux nations dont l'effectif était supérieur à 1 000 unités et ayant publié leurs résultats.

On note la diversité des résultats obtenus: services de marchandises lourds sur grandes distances sans arrêts et sans temps morts en Amérique, services légers en Allemagne et au Japon, service mixte en France. On conçoit dans ces conditions la difficulté d'établir une comparaison entre la rentabilité des diverses locomotives. Toutefois, pour un type de trafic déterminé, on peut, au sein d'un même pays, établir un jugement de valeur en tablant sur le fait que le matériel installé à bord d'une locomotive correspond à une certaine puissance et la compagnie ferroviaire doit en retirer le maximum de profit. On est ainsi conduit à

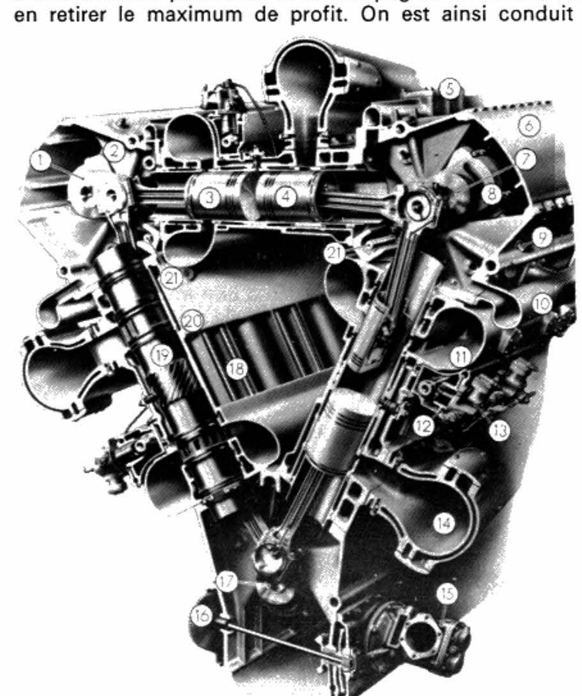


Fig. V-31 — Vue en coupe du moteur Diesel Napier-Deltic (*D. Napier and Son Ltd*)

1. Vilebrequin BC. 2. Carter BC. 3. Piston côté admission. 4. Piston côté échappement. 5. Tubulure d'aspiration du carter. 6. Carter AB. 7. Vilebrequin AB. 8. Chapeau du palier principal. 9. Tirant du carter. 10. Tubulure d'évacuation d'huiles. 11. Conduites d'entrée d'air. 12. Enveloppes de l'arbre à cames A. 13. Pompe d'injection du combustible. 14. Tubulure d'échappement. 15. Pompe à eau de mer. 16. Entraînement de la pompe à eau douce et de la pompe à huile. 17. Vilebrequin CA. 18. Boulons traversant le bloc de cylindres. 19. Chemise du cylindre. 20. Bloc de cylindres C. 21. Arbres flexibles de commande de la soufflante. (On appelle A, B, C, les trois blocs de cylindres)

	Nombre de locomotives	Puissance totale en kilowatts	Parcours effectués en 1968 (10^3 km)	Tonnes-kilomètres brutes remorquées en millions
Allemagne Fédérale	2 335	1 880 000	111 661	28 255
Canada — Canadian National	2 001	2 250 000	84 649	
Canada — Canadian Pacific	1 124	1 285 000	42 593	109 050
États-Unis d'Amérique	27 045		800 000	2 000 000 environ
France	1 763	1 260 000	103 800	31 830
Grande-Bretagne	4 376 (y compris environ 1 500 locotracteurs)		208 507	
Japon	1 030	980 000	36 175	12 540

envisager un indice de productivité défini comme étant le rapport :

$$\frac{\text{Tonnes kilométriques brutes remorquées par locomotive et par mois (ou année)}}{\text{Puissance installée dans une locomotive}}$$

C'est un nombre pondérable en tenant compte des annuités d'amortissement et des frais de conduite, d'entretien et de réparation.

3.2. Les locomotives à turbine à gaz. — Tandis que s'accomplissait l'important développement des locomotives diesel, quelques locomotives équipées de turbine à gaz virent le jour pour des applications de grande traction. La première, suédoise, construite en 1933 par Gotaverken et Nohab, comportait, d'une part, un diesel 2 temps entraînant un compresseur d'air et d'autre part une turbine à gaz. Les gaz s'échappant du diesel se détendaient dans la turbine mécaniquement liée aux essieux. Cette réalisation d'avant-garde souscrivait donc à l'impératif, reconnu beaucoup plus tard, de dissocier mécaniquement l'étage générateur de gaz et l'étage moteur. La locomotive prototype de 1 600 kW à transmission électrique, construite en 1941 pour les Chemins de fer fédéraux suisses par Brown Boveri et Sulzer, ne souscrivait pas à cette nécessité, la turbine étant à un seul arbre ; par ailleurs sa consommation spécifique au régime nominal était plus de deux fois supérieure à celle d'un diesel de même puissance.

La turbine à gaz est, certes, réputée pour brûler des combustibles de qualité inférieure (sous réserve d'absence de vanadium et de sodium dont les oxydes attaquent à chaud les ailetages de turbine) mais, en service ferroviaire, on ne peut tirer plein profit pécuniaire de cet avantage technique car ces combustibles possèdent en général un point de liquéfaction élevé.

En 1948, le réseau américain de l'*Union Pacific* mit en service une locomotive à turbine à gaz, également à un seul arbre, développant 3 500 kW pour une température devant la turbine de 700 °C et entraînant une transmission électrique. Vingt-cinq locomotives semblables furent commandées à la *General Electric*, suivies en 1959 de trente locomotives à une seule turbine de 6 250 kW ; ces locomotives de 530 t (fig. V-32) sont constituées de deux

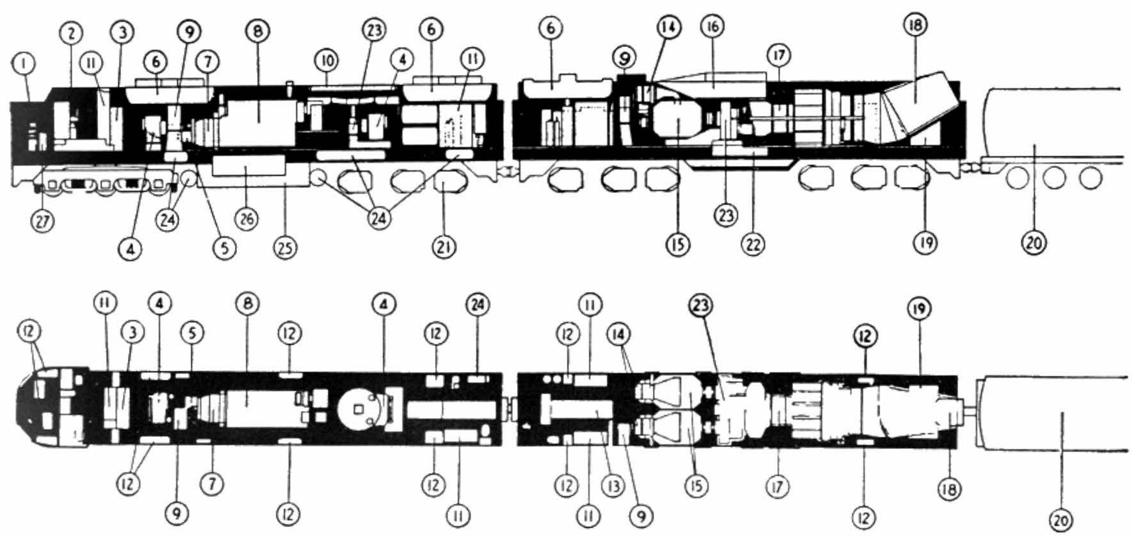


Fig. V-32 — Locomotive à turbine à gaz de 6 250 kW de l'Union Pacific Railroad ; dispositions d'ensemble

1 - Équipement de frein à air
2 - Cabine de conduite
3 - Commande des auxiliaires
4 - Compresseur d'air du frein
5 - Génératrice auxiliaire
6 - Frein rhéostatique
7 - Génératrice courant continu
8 - Moteur Diesel auxiliaire
9 - Ventilateur moteur de traction
10 - Radiateur
11 - Commande de propulsion
12 - Sablière
13 - Commande de l'excitation
14 - Ventilateur de génératrice
15 - Génératrices de traction
16 - Admission d'air à la turbine
17 - Turbine à gaz
18 - Échappement de la turbine
19 - Support de l'ensemble moteur
20 - Wagon citerne de combustible de la turbine à gaz
21 - Moteurs de traction
22 - Réservoir d'huile de graissage
23 - Réducteur
24 - Réservoir d'air
25 - Réservoir à combustible du diesel
26 - Coffre de la batterie
27 - Appareils de commande

unités CC et d'un tender; la consommation spécifique de la turbine est de 476 g/kWh d'un combustible provenant directement d'un brut extrait par l'*Union Pacific* sur son propre domaine. Ces locomotives d'une longueur totale de 42 m remorquent des trains très lourds entre Omaha et Los Angeles (sans arrêt), soit sur un trajet voisin de 3 000 km; la nécessité où elles se trouvent de ne pouvoir circuler que dans un seul sens de marche impose la présence de triangles de retournement à chaque extrémité du parcours. La turbine, à l'entrée de laquelle les gaz sont à 785 °C, est à deux étages; elle entraîne, d'une part, le compresseur à 16 étages fournissant, par heure, 260 t d'air à 6,7 bars et 270 °C et d'autre part, quatre génératrices à courant continu par l'intermédiaire d'un réducteur abaissant la vitesse de rotation de 4 870 tr/mn (sortie turbine) à 1 050 tr/mn (entrée génératrice). Chaque génératrice alimente les trois moteurs de traction d'un même bogie. Ces locomotives, capables de 105 km/h, développent au démarrage un effort de 92.10^3 daN; leur effort de traction en régime continu, à la vitesse de 29 km/h, est de 66.10^3 daN.

Ces locomotives ont été retirées du service en 1970 en raison des difficultés de combustion se produisant lors du franchissement de tunnels de grande longueur.

Par ailleurs, plusieurs réseaux américains de l'Est, dont l'activité principale est la remorque de trains de charbon, mirent en service, après de très longs essais en plate-forme, une locomotive dont la turbine à gaz alimentée au charbon pulvérisé développait 5 150 kW. Ce prototype construit par Westinghouse n'eut pas de suite.

Les Chemins de Fer Britanniques expérimentèrent en 1949 une locomotive équipée avec une turbine Brown Boveri d'une puissance de 1 850 kW et en 1951 une locomotive équipée avec une turbine Vickers d'une puissance de 2 200 kW. Toutes deux, équipées avec une turbine à un seul arbre et à transmission électrique, furent rapidement retirées du service en raison de leur fonctionnement peu économique.

Le fait d'entraîner le compresseur d'air par une turbine mécaniquement indépendante de la turbine motrice aurait considérablement amélioré le comportement des turbines de toutes ces réalisations lors des fonctionnements à faible vitesse et couple élevé (fig. V-33); cela leur aurait conféré de brillantes qualités lors des démarrages et aurait permis d'adopter une transmission mécanique simple (fig. V-34).

Les premières réalisations ferroviaires d'engins à turbine dans laquelle la turbine motrice est dissociée du générateur de gaz ont été — mise à part la réalisation suédoise de 1933 — des turbines alimentées par générateur à pistons libres, lequel ne diffère d'un diesel 2 temps à pistons opposés que

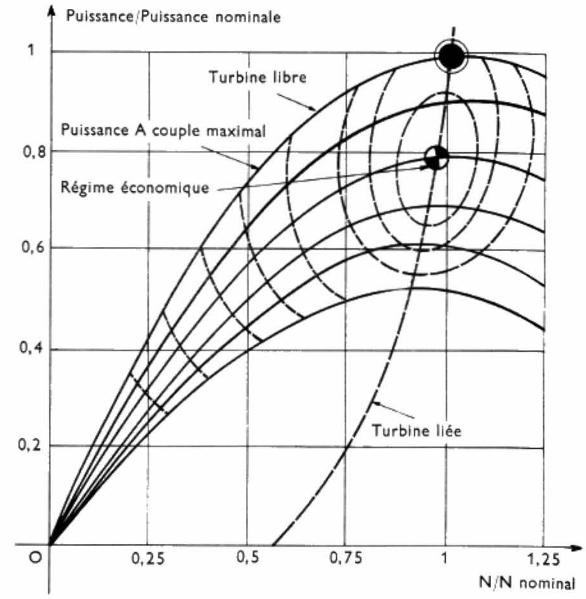


Fig. V-33 — Comparaison des puissances d'une turbine liée (un arbre) et d'une turbine libre (deux arbres)

par l'absence d'organes de transmission des efforts mécaniques. Dans ce moteur, dépourvu de bielles, la combustion peut avoir lieu presque entièrement à volume constant (donc au rendement thermodynamique maximal, fig. V-35); de plus l'excès d'air est faible et les températures maximales sont voisines de 2 000 °C. La détente amorcée dans le cylindre diesel s'achève dans une turbine directement liée à l'organe récepteur, en l'occurrence les essieux, turbine dans laquelle les gaz entrent à une température très modérée.

En 1952, la Régie Nationale des Usines Renault expérimenta sur Paris—Cambrai une locomotive BB à transmission mécanique équipée avec un générateur S.I.G.M.A. et une turbine de 750 kW. Les résultats satisfaisants incitèrent la R.N.U.R. à construire, en collaboration avec C.A.F.L., deux locomotives CC munies chacune de deux générateurs plus puissants (1 770 kW au total) alimentant chacun une turbine entraînant les essieux d'un bogie par une transmission mécanique à 2 rapports. Ces deux locomotives, affectées en 1961 au dépôt de La Rochelle, assurèrent en

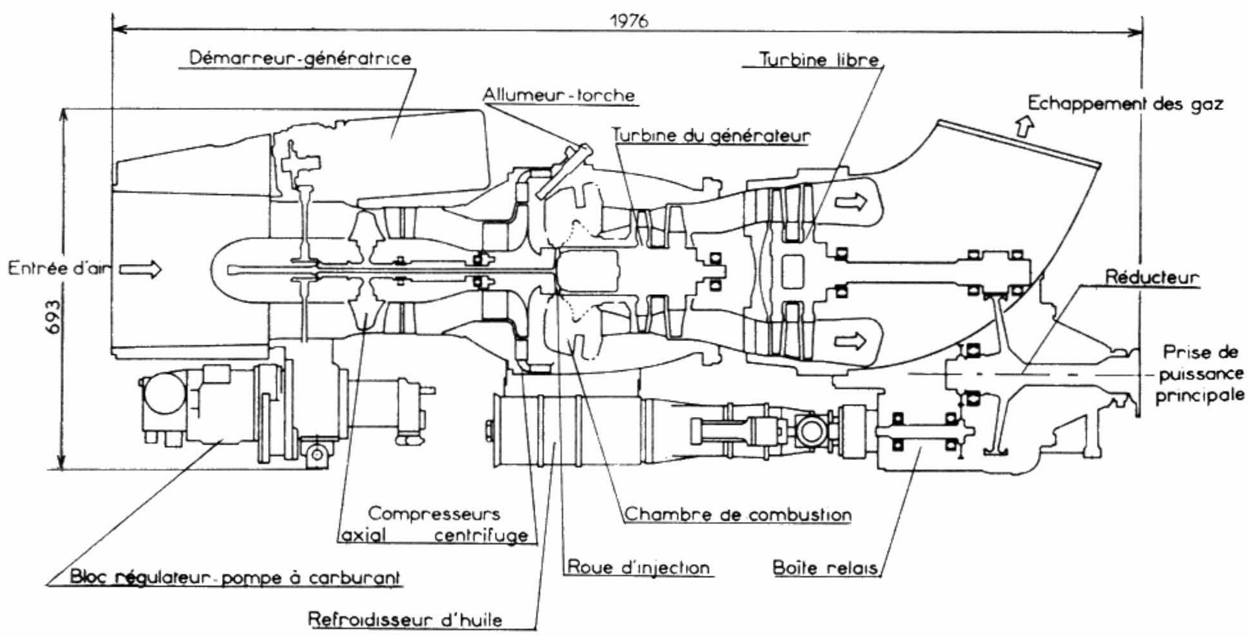


Fig. V-34 — Turbomoteur; puissance nominale: 1 100 kW (*Turbomeca*)

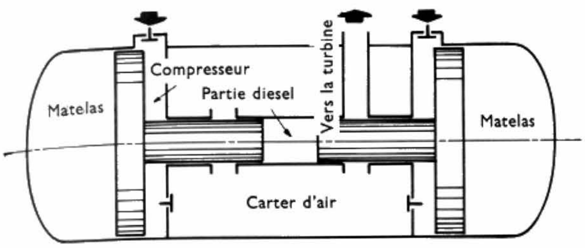


Fig. V-35 Schéma de fonctionnement d'un générateur à pistons libres à compression durant la course retour

particulier, la remorque de trains de marchandises lourds. Leur exploitation fut arrêtée lorsque la R.N.U.R., qui en était propriétaire, prit la décision de cesser toute activité ferroviaire.

Il semble que les Chemins de fer de l'U.R.S.S. aient en service un certain nombre de telles locomotives à turbine à gaz alimentées par générateurs à pistons libres, ainsi d'ailleurs que quelques locomotives à turbine à gaz traditionnelle.

Ces engins étaient, à notre connaissance, les seules locomotives à turbine à gaz en service en 1970. Cependant, il faut mentionner une expérimentation intéressante effectuée par la D.B. sur une locomotive Diesel du type V 160 (rebaptisée V 219) dans laquelle une turbine à gaz américaine, construite sous licence par Deutz, turbine développant 660 kW, a été adjointe au diesel. Cette turbine, utilisée uniquement à sa puissance maximale, dans une zone de consommation spécifique favorable, apporte un appoint de puissance temporaire lors des accélérations et lors du franchissement de points difficiles. Cette expérimentation s'avère intéressante.

La S.N.C.F. de son côté envisage la création d'un prototype de locomotive purement turbine à gaz à deux arbres d'une puissance supérieure à 4 000 kW sur l'arbre moteur.

Il est donc incontestable que les Chemins de fer s'intéressent toujours à la traction par turbine à gaz malgré les difficultés de mise en œuvre (débit de gaz, insonorisation) et la difficulté d'utiliser des combustibles de basse qualité dont la turbine s'accommode mais dont le point de liquéfaction est trop élevé pour que leur emploi soit envisageable en traction terrestre. Les sommes considérables affectées à la mise au point de ces engins dans le domaine aéronautique devraient permettre, à plus ou moins longue échéance, de développer une turbine à vocation ferroviaire pour des locomotives dont la puissance peut être considérée comme sortant du domaine du moteur Diesel.

4. LA PARTIE THERMIQUE

4.1. Cas des engins à moteur Diesel ; les fonctionnements à régime variable. — Du fait de la faible inertie des pièces en mouvement, de la variation limitée de la consommation spécifique de combustible en fonction de la vitesse de rotation et du couple, et de la faible variation du couple maximal en fonction de la vitesse dans un large domaine de fonctionnement, le diesel rapide se prête bien aux services à régimes variables des transports terrestres ; mais, du fait même, le diesel ferroviaire est, tout comme le diesel routier, l'objet d'importantes vagues de sollicitations thermiques. Elles superposent leurs effets à ceux dus aux sollicitations mécaniques et thermiques que tout diesel subit à chaque cycle du fait de la combustion intermittente du mélange d'air et de combustible.

Pour cette étude on utilisera les notations suivantes :

E : module d'élasticité.
α : coefficient de dilatation linéaire.
μ : coefficient de Poisson ou de concentration latérale.
λ : coefficient de conductivité thermique.
ρ : masse volumique. q_s : capacité calorifique.
θ : température du matériau. t : temps.

Les sollicitations mécaniques ont une valeur maximale bien déterminée, fonction de la pression maximale de combustion et des forces d'inertie centrifuges et alternatives ; assimilables à des efforts de traction ou de compression, elles intéressent instantanément toute la structure du moteur car elles se propagent à la vitesse du son.

Les sollicitations thermiques se manifestent en charges et en contraintes. Les premières (densité de flux thermique) conditionnent les températures des structures ; elles influencent au premier chef l'huile de graissage dont elles abaissent la viscosité, (c'est-à-dire l'aptitude à former un coin d'huile résistant entre deux surfaces se déplaçant sous charge) et elles en altèrent les propriétés physico-chimiques ; ces charges thermiques dégradent également les propriétés de résistance mécanique des solides, particulièrement des joints, constituant la structure. Les secondes, comme les contraintes mécaniques, s'expriment en décanewtons par millimètre carré (ou en pascals) ; elles se manifestent sous forme d'efforts de cisaillement et provoquent elles aussi des déformations de structures par suite de dilatations dues :

— à un gradient $\Delta\theta$ de température (variation dans le temps des températures de la source de chaleur, gradient dans l'espace des températures entre deux pièces de même nature) ;

— à un gradient $\Delta\alpha$ des dilatations entre deux pièces de nature différente mécaniquement liées (bilames) ;

— à la conjugaison de ces deux types de gradients.

Dans tous les cas, les contraintes thermiques, qui se manifestent par une déformation différentielle, sont dues à l'obstacle créé au libre déplacement des particules par suite de leur liaison avec des particules soit moins chaudes soit moins dilatées. Ces sollicitations thermiques se propagent à des vitesses lentes, tributaires qu'elles sont de la conductivité thermique des matériaux intéressés.

Lorsque le flux thermique est stationnaire, les déformations évoluent dans le temps par suite de l'uniformisation des températures : les contraintes ont donc tendance à se relâcher, à moins, évidemment, qu'il n'y ait eu une déformation à caractère irréversible (dépassement de la limite élastique d'un matériau par exemple). Lorsque le flux n'est pas stationnaire, ce relâchement n'a pas lieu, et la propagation s'effectue en fonction de la *diffusivité* thermique, rapport de la *conductivité* thermique λ (calories par centimètre par seconde et par degré Celsius) et de la chaleur volumique (calories par centimètre cube et par degré Celsius). Cette diffusivité est assimilable à une viscosité cinématique. En un point elle est approximativement :

— proportionnelle à l'abscisse de ce point ;

— inversement proportionnelle au carré du temps mis par le signal thermique pour parvenir en ce point.

Les contraintes thermiques provoquées par des variations de température de grande fréquence, telles celles des gaz de combustion, ne se manifestent que sur de très faibles profondeurs (fussent-ce ces variations très importantes) et n'intéressent donc que les structures superficielles de pièces qui, telles les cylindres, les culasses, les pistons, sont de formes géométriques simples, tout au moins aux abords des surfaces en question ; les déformations induites sont donc relativement isotropes et ne peuvent prendre naissance qu'au sein de pièces déjà calculées par ailleurs pour résister sans se déformer à des sollicitations mécaniques importantes (lesquelles intéressent toute leur masse).

Au contraire, les variations de température dues à des variations de régime (couple ou vitesse), bien que d'amplitude moins importante que les variations cycliques, intéressent toute la profondeur de la structure et y créent des contraintes élevées (puisque la seule variation de 100 °C d'un barreau en acier bloqué à ses extrémités provoque une contrainte $E.\alpha.\theta = 22$ daN/mm²). Les variations dues au retour brusque du moteur au ralenti sont particulièrement nocives car les débits des pompes à huile et à eau diminuent (ainsi que la pression de l'eau, ce qui entraîne de sérieux risques de vaporisation) ; pour les couches profondes des structures, les inéluctables échanges calorifiques s'effectuent alors à un niveau de température plus élevé qu'à plein régime entraînant à la fois des déformations supplémentaires et des conditions de lubrifications précaires. Leurs nocivités conjointes sont particulièrement sensibles en haut des cylindres.

1° *Influence des structures.* — La structure des diesels à vocation ferroviaire doit être pensée avec le souci constant d'épanouir aussi harmonieusement que possible les flux de

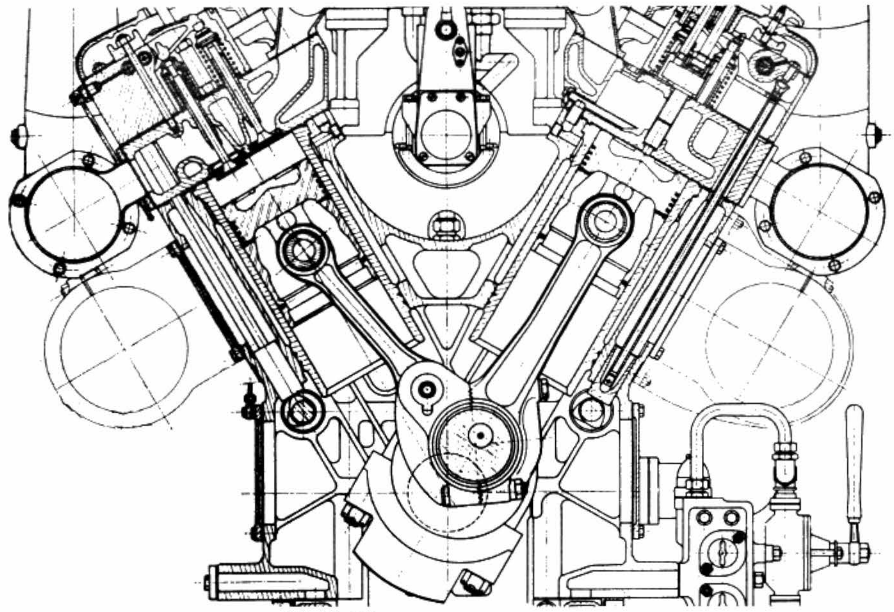


Fig. V-36

Moteur MGO en V à embiellage bielle-biellette (*Société alsacienne de constructions mécaniques de Mulhouse*)

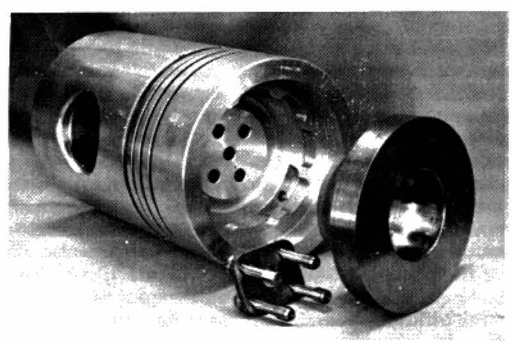


Fig. V-37

Piston composite avec chambres en cuproalliage (*AGO*)

chaleur (afin de diminuer $\frac{\delta\theta}{\delta x}, \frac{\delta\theta}{\delta y}, \frac{\delta\theta}{\delta z}$) ; en particulier il faut éviter tout assemblage inutile dont les surfaces de contact, si bien dressées soient-elles (donc onéreuses), constituent en fait une solution de continuité à l'égard du flux thermique, donc une source de contraintes thermiques dont les manifestations ne se font sentir qu'à longue échéance ; ainsi les bâtis-cylindres assemblés par tirants, excellents certes à l'égard des contraintes mécaniques, sont critiquables dans le cas des diesels appelés à changer fréquemment de régimes, surtout si ces moteurs sont à grand alésage (le flux varie proportionnellement à l'alésage).

L'impératif traditionnel d'un bâti-cylindres robuste doit donc se doubler de l'impératif supplémentaire d'indéformabilité, impératif plus subtil et particulièrement important dans le domaine des moteurs à flux thermique non permanent. Ces impératifs, tout aussi cruciaux à l'égard du vilebrequin, sont à nouveau particulièrement importants dans le domaine ferroviaire où le moteur est appelé à fonctionner à plein couple à faible vitesse et avec des huiles chaudes ; l'indispensable rigidité en flexion ne pouvant être obtenue par accroissement des sections du vilebrequin, il faut un vilebrequin à manetons courts, à bras (flasques) épais, présentant un important recouvrement maneton/tourillon. Cela conduit à des moteurs ayant un faible rapport $\frac{\text{course}}{\text{alésage}}$ et possédant des contrepoids d'équilibrage à chaque manivelle.

En passant il faut souligner l'incontestable intérêt que présente, pour les moteurs en V, l'adoption du système bielle-biellette (fig. V-36). Il permet la mise en œuvre de manetons courts sans que les pressions spécifiques sur coussinet soient importantes.

Les variations de charge thermique sont particulièrement ressenties par les surfaces des culasses et des pistons. Il faut alors examiner conjointement mais séparément :

— l'aptitude physique du matériau à engendrer des contraintes d'origine thermique,

— l'aptitude mécanique dudit matériau à résister à ces contraintes.

On va considérer un piston dont la température de tête est homogène. Si la quantité de combustible brûlée par unité de temps est brutalement augmentée, une différence de température $\Delta\theta$, pouvant atteindre 150 °C, s'établit alors entre la fibre périphérique et le centre de la tête du piston : il s'ensuit une contrainte thermique : $E.\alpha.\frac{\Delta\theta}{2}$ qui est de l'ordre de grandeur des contraintes mécaniques. En assimilant cette tête de piston à l'assemblage d'une jante à la température θ_0 et d'un disque intérieur à la tempéraautre $(\theta_0 + 150)$, on déduit l'épaisseur minimale du disque nécessaire pour éviter les fissurations.

Le refroidissement des pistons par circulation interne d'huile, en partant soit d'un forage dans la bielle, soit ce qui est mieux, d'un gicleur situé sur le bâti-cylindres, abaisse les températures régnant au sein de la tête du piston et en fond de gorges de segments de tête ; cette mesure limite donc l'amplitude des contraintes thermiques dues au gradient de température dans l'espace qui s'établit en régime continu. Pour abaisser encore ces contraintes, certains (tel General Motors) remplacent les pistons en aluminium par des pistons totalement (ou partiellement) en acier, ce qui abaisse le facteur : $\frac{E\alpha}{1-\mu}\lambda$, caractérisant ces contraintes sous flux continu ; cette technique offre l'intérêt supplémentaire de diminuer les usures et matages des gorges de segments sans que la masse globale du piston soit sérieusement augmentée.

Les pistons, dans la tête desquels est ménagée une chambre de turbulence, présentent parfois des fissurations radiales partant du bord des lèvres, conséquences des accroissements brutaux de température ; le facteur directeur de ces contraintes superficielles dues au gradient thermique dans le temps est $E.\alpha\sqrt{\frac{qs.\rho}{\lambda}}$; le paramètre « température » prend une importance accrue du fait de son influence sur les caractéristiques mécaniques du matériau. De plus, étant donné le caractère de choc thermique subi par le piston lors des variations de charge brutales, il faut également tenir compte de l'aptitude du matériau à absorber élastiquement l'énergie produite par le choc. En réalité, le problème est très complexe et une solution satisfaisante ne peut provenir que de matériaux à structure homogène, c'est-à-dire d'alliages. Dès 1963, la S.N.C.F. a fait réaliser des pistons avec chambres en cuproalliage ; les résultats obtenus ont incité les constructeurs à recourir à cette technique (fig. V-37).

Tableau de quelques moteurs quatre temps de locomotives

Type de moteur	Maybach MD 870	Daimler MB 839 Bb	S.E.M.T. 16 PA 4	A.G.O. V 12 DSHR	Sulzer 12 LVA 24	Alco 251 C
Type de locomotive	V 160	V 160 V 320	BB 67000 BB 69000	A1A-A1A 68 500	A1A-A1A 68 000	C 628 C 855
I. CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES						
Nombre et disposition des cylindres	16 V	16 V	16 V	12 V	12 V	16 V
Masse (kilogrammes)	6 450	7 335	7 050	12 000	14 400	19 000
Puissance d'utilisation (kilowatts)	1 400	1 470	1 770	1 980	1 980	2 240
Vitesse de rotation (tours par minute) ...	1 500	1 500	1 500	1 350	1 050	1 050
Alésage (millimètres)	185	190	185	230	240	228,6
Course (millimètres)	200	230	210	220-230	280	266,7
Cylindrée (décimètres cubes)	86,08	104,32	90,20	112,20	152	175,13
II. CRITÈRES DE DIMENSIONNEMENT						
Course/alésage	1,08	1,21	1,14	0,96	1,17	1,17
Longueur de bielle/course	2,02	1,78	1,95	2,48	2	1,98
∅ axe de piston/alésage	0,35	0,30	0,38	0,40	0,46	0,42
∅ maneton/alésage	0,58	0,65	0,69	0,65	0,81	0,68
III. CRITÈRES D'INSTALLATION						
Décimètres cubes par kilowatt	7,87	4,85	4,82	6,96	10,40	
Kilogrammes par kilowatt	4,13	4,97	3,96	6,05	7,25	8,46
IV. CRITÈRES DE FONCTIONNEMENT						
Qualités de combustion						
Critère thermique : consommation (grammes par kilowattheure)	231	232	234	211	224	237
Critère mécanique : pression maximale sur bossages de piston (bars)			436	428	380	
Charges thermiques						
Pression moyenne effective (bars)	12,9	11,3	15,7	15,8	14,6	14,6
Calories par cm^2 de tête de piston ...	18,6	16,4	21,4	20,7	25,6	
Refroidissement de l'air de suralimentation (kilojoules par kilowattheure)	410	337	638	541	419	
Charges mécaniques						
Vitesse moyenne du piston (mètres par seconde)	10	11,5	10,5	9,9	9,8	9,3
Vitesse périphérique du maneton (mètres par seconde)	8,65	9,85	10	10,6	10,7	8,5
Pression max. sur coussinet de bielle (bars)			255	148 (1)	280	

(1) Embiellage du type bielle-biellette.

Caractéristiques de moteurs de traction ferroviaire pour autorails

Pays d'origine	FRANCE				République fédérale allemande		Italie		Grande-Bretagne	Pays-Bas	États-Unis d'Amérique
Constructeurs	Poyaud	Saurer	SACM	RNUR	MAN	Maybach	OM-FIAT	FIAT	Paxman	Werkspoor	GM
Type de moteur	C6150SrHT	SDHR	MGOVI2BSH	577	D2850 M1U	MD 435	SEV	218	12 RPHL	RUB 168	6-110
Puissance nominale (kilowatts)	331	349	607	368	323	588	464	515	454	302	205
Vitesse nominale (tours par minute)	1 800	1 500	1 500	1 500	1 950	1 500	1 500	1 500	1 500	1 400	1 800
Cycle (nombre de temps)	4 t (suralimentation)	4 t (suralimentation)	4 t (suralimentation)	4 t (suralimentation)	4 t	4 t (suralimentation)	4 t	4 t	4 t	4 t (suralimentation)	2 t
Nombre et disposition des cylindres	6 horizontaux	6 horizontaux	12 en V	12 en V	12 à plat pistons opp.	8 en V	12 en V	8 en V	12 en V	8 en V	6 en ligne
Alésage (millimètres)	150	175	175	150	128	185	175	210	178	160	127
Course (millimètres)	180	200	180-192	170-179,5	155	200	200	230	197	200	142
Vitesse moyenne du piston (mètres par seconde)	10,8	10	9-9,6	8,5-9	10,1	10	10	11,5	9,8	9,3	8,5
Pression moyenne effective (bars)	11,6	9,7	9	8,1	8,5	11,1	6,5	6,6	7,7	8	6,5
Type d'embiellage ba : bielles accolées bb : bielle-biellette bf : bielles à fourche	—	—	bb	bb	ba	bf	ba	ba	bf	ba	
Pression spécifique sur maneton (bars)	335	175	250								
Consommation spécifique de combustible (grammes par kilowattheure)	215	226	222	231	234	226	227			235	295
Pression de suralimentation absolue (bars)	2	1,9	1,7	1,4		1,6				1,3	
Masse du moteur sec (kilogrammes)	2 460	2 900	4 150	2 800	2 350	3 225	3 990	5 400	4 750	2 800	1 210
Masse spécifique (kilogrammes par kilowatt)	7,4	8,3	6,8	7,6	7,3	5,5	8,6	10,5	10,5	9,3	5,9

2° *Influence de la mise en cohérence géométrique préalable.* — Du fait de ces variations de charge, les structures du diesel ferroviaire connaissent des distorsions géométriques plus ou moins importantes; elles ont pour résultat d'accentuer la nocivité des contacts prolongés s'établissant entre des surfaces à formes antagonistes, présentées par des pièces en regard constituant des assemblages se déplaçant sous charge (fig. V-38).

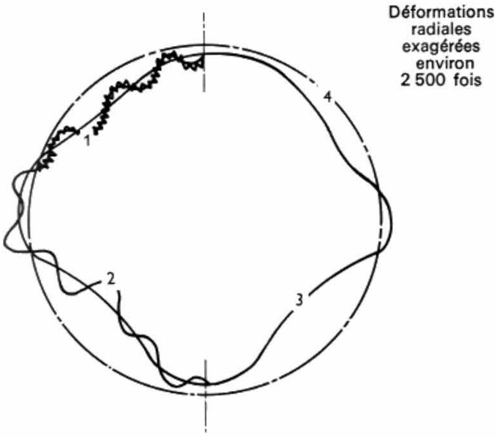


Fig. V-38

1. Forme réelle: rugosités de surface. 2. Forme réelle: ondulations de surface. 3. Forme apparente mesurée chemise en place, culasse serrée à chaud. 4. Forme théorique de la chemise à l'état libre

Les pièces considérées doivent donc être l'objet d'un usinage final extrêmement soigné, usinage final effectué in situ, les pièces ayant déjà subi les premières déformations dues à la constitution de l'assemblage. Cet usinage final, appelé rodage, est une opération capitale pour tout moteur destiné à subir des variations de charge dès les premières heures de son existence. L'assemblage le plus critique est constitué par l'ensemble cylindre, piston, segment; pour effectuer une mise en forme correcte et rapide du cylindre assemblé à chaud la S.N.C.F. a normalisé l'emploi de segments de tête revêtus de chrome rugueux.

3° *Influence de l'environnement.* — Les diesels ferroviaires doivent, toutes choses restant égales par ailleurs:

— reposer dans l'habitacle au moyen de liaisons permettant les libres dilatations;

— être conduits avec le souci constant d'adoucir au maximum les inévitables variations de régime;

— être lubrifiés avec des huiles à haut index naturel de viscosité et d'autant plus résistantes à haute température que l'alésage et la pression moyenne effective du moteur sont plus élevés;

— posséder un circuit d'eau de refroidissement mis sous pression afin d'empêcher les poches de vapeur en haut des cylindres. Il faut souligner qu'à partir de l'instant où la vaporisation se produirait, la situation irait en se dégradant très rapidement, car alors les échanges thermiques à travers les hauts de cylindres deviendraient pratiquement nuls.

Cette technologie offre les avantages supplémentaires:

— de permettre de diminuer l'importance des radiateurs de refroidissement (donc d'alléger le prix et le poids de la locomotive ainsi que les frais d'entretien) surtout dans les régions chaudes;

— de rendre négligeables les corrosions dynamiques par cavitation des cylindres et des bâtis.

La corrosion des chemises et bâtis par cavitation constitue l'un des phénomènes spécifiques des moteurs à vitesse variable. Pour une certaine vitesse, en effet, la paroi du cylindre (et, le cas échéant, du bâti) entre en vibration résonnante et est le siège d'oscillations à haute fréquence perpendiculaires à sa surface. Il s'ensuit une succession de détentes et de surpressions de l'eau de refroidissement: l'amplitude des détentes, particulièrement importante dans le plan d'oscillation de la bielle, peut provoquer une vaporisation locale de l'eau et la libération de gaz dissous dans cette eau. Les bulles microscopiques qui se forment alors disparaissent durant le trajet retour de la paroi vibrante; leur disparition provoque des chocs sur la paroi qui, atteignant des valeurs voisines de 100 daN/mm², détruisent le matériau du cylindre (ou du bâti). Il s'ensuit la création d'une multitude de puits qui cheminent dans l'épaisseur de la paroi, en mettant à nu la fonte qui était, à l'état original, revêtue de rouille (celle-ci la protégeait contre la corrosion électrochimique). Ainsi, même durant l'arrêt du moteur, la corrosion se poursuit au fond de ces puits et le cylindre peut être perforé assez rapidement.

Le phénomène est évidemment d'autant plus marqué que la température de l'eau est plus élevée et la pression plus basse; par ailleurs, il se manifeste plus intensément sur les moteurs munis d'un régulateur qui maintient constante la vitesse de rotation en ajustant le couple moteur au couple résistant puisque la vitesse régulée peut coïncider avec la vitesse de résonance. Pour combattre cette corrosion dynamique, certains ajoutent à l'eau des produits qui, à la fois, augmentent la tension superficielle (donc reculent le seuil d'apparition des bulles) et limitent l'attaque électrochimique; mais ce remède ne peut s'appliquer qu'à des moteurs peu sujets à la corrosion par cavitation. La meilleure solution est évidemment d'empêcher la formation des bulles en mettant tout le circuit d'eau sous pression extérieure — solution adoptée par la S.N.C.F. — en se servant de l'air comprimé nécessaire pour le freinage (à noter que cette technique a amélioré le comportement des radiateurs qui subissent moins de contraintes thermiques du fait de l'absence de passages de tampons de vapeur). Un autre avantage est de diminuer considérablement la consommation d'eau.

Le débit d'eau assuré par la pompe doit être tel que, au régime nominal, la différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée du moteur soit voisine de 4 °C; ainsi, lors des retours brusques au ralenti, cette différence ne dépasse pas 10 °C et les distorsions survenant alors au sein du moteur sont limitées. Pour amenuiser le bruit provoqué par la rotation des ventilateurs assurant le refroidissement de l'eau, la S.N.C.F. a normalisé l'adoption de ventilateurs à pales en résine stratifiée montées sur attaches oscillantes; le nombre de pales est premier avec le nombre des aubages directeurs du stator. La diminution de bruit ainsi obtenue est complétée par la présence de diffuseurs amont et aval en complexe verre-polyester.

4.2. Cas des engins à turbine à gaz — Parallèle avec le diesel. — Du fait de leur inertie, de la vulnérabilité de leurs ailetages (vulnérabilité aux chocs thermiques) et de leurs caractéristiques de consommation spécifique de combustible, les turbines à gaz sont réservées à des engins qui, par vocation, ne doivent pas subir de brusques variations de régime. Leur comportement bénéficie au premier chef de cet état de fait et toute comparaison avec le diesel doit tenir compte de ces prémices.

La turbine à gaz ferroviaire connaît néanmoins des variations de charge et l'on a déjà souligné qu'une telle turbine doit être une turbine à deux arbres mécaniquement indépendants. Le fait d'entraîner le compresseur par une turbine particulière apporte une amélioration du comportement et de l'économie de l'ensemble, indispensable au fonctionnement à faible vitesse et à couple élevé.

Les processus thermodynamiques du diesel et de la turbine sont identiques puisque, dans les deux cas, après une première étape où la chaleur libérée par la combustion a augmenté la température (donc la pression) d'un gaz, dans une seconde étape, celui-ci transmet en se détendant, son énergie à un arbre moteur. Mais les cycles fonctionnels sont tout différents; dans le diesel la chambre de combustion n'est soumise qu'à la température moyenne des gaz, ce qui permet la production de très hautes températures instantanées au cours d'une combustion qui se développe partiellement (entre 20 et 30 %) à volume constant: le rendement thermodynamique est donc très élevé; dans la turbine, moteur à flux continu, la chambre de combustion est soumise à une température constante dont la valeur ne peut donc être très élevée et la combustion s'effectue entièrement à pression constante, voire légèrement décrois-

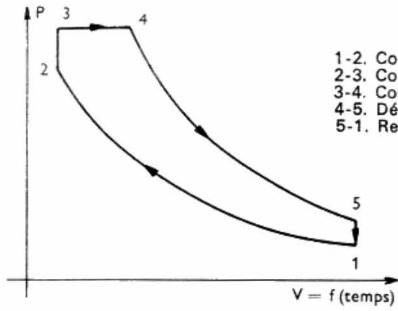


Fig. V-39 a

Cycle Diesel
1-2. Compression isentropique
2-3. Combustion isochore
3-4. Combustion isobare
4-5. Détente isentropique
5-1. Refroidissement isochore

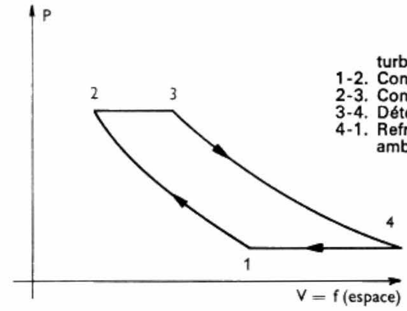


Fig. V-39 b

Cycle d'une turbine à combustion
1-2. Compression isentropique
2-3. Combustion isobare
3-4. Détente isentropique
4-1. Refroidissement à pression ambiante

sante: le rendement thermodynamique est donc faible (fig. V-39 a et b).

Quant au rendement mécanique, si le diesel subit de nombreux frottements internes qui obèrent ce rendement, la turbine, quant à elle, doit comprimer un excès d'air considérable afin de juguler la température des gaz de combustion, ce qui constitue un handicap sérieux.

Il s'ensuit que la consommation spécifique optimale de la turbine est plus élevée que celle du diesel et que la consommation à régime variable est beaucoup moins avantageuse (fig. V-40).

En réalité ce qui permet à la turbine d'être compétitive c'est la seconde étape du processus thermodynamique, celle durant laquelle le mouvement alternatif du diesel provoque une faible capacité respiratoire et une discontinuité de l'énergie motrice, cause d'une mauvaise utilisation de la matière. Par surcroît, du fait des déplacements alternatifs, la vitesse d'action du fluide reste faible et les énergies moyennes mises en jeu par unité de volume et unité de masse sont modestes. Au contraire, dans une turbine, la circulation de gaz à grande vitesse et en régime continu permet une excellente utilisation de la matière. Ainsi, alors que la masse « puissancique » des diesels les plus performants ne descend guère au-dessous de 4 kg /kW, la turbine atteint sans grande difficulté ni risque, 0,25 kg/kW. Mais il faut objectivement remarquer que, en réalité, le rapport des masses est plus faible car, à la masse nette de la turbine, il faut ajouter l'insonorisation et la masse supplémentaire du combustible nécessaire pour effectuer un parcours déterminé, tandis que du côté diesel il faut tenir compte du système de refroidissement et de l'eau parcourant ce système.

Pour limiter l'importance de la masse supplémentaire de combustible que requiert la turbine, en particulier lorsque

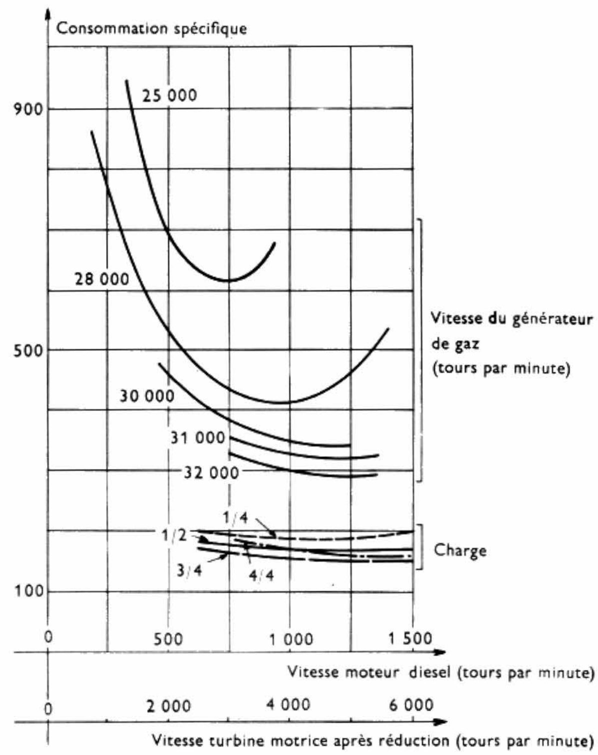


Fig. V-40

Consommations spécifiques comparées d'un turbomoteur et d'un moteur Diesel de puissance équivalente
La consommation spécifique est exprimée en grammes par cheval-heure
(1 ch-h = 736 Wh)

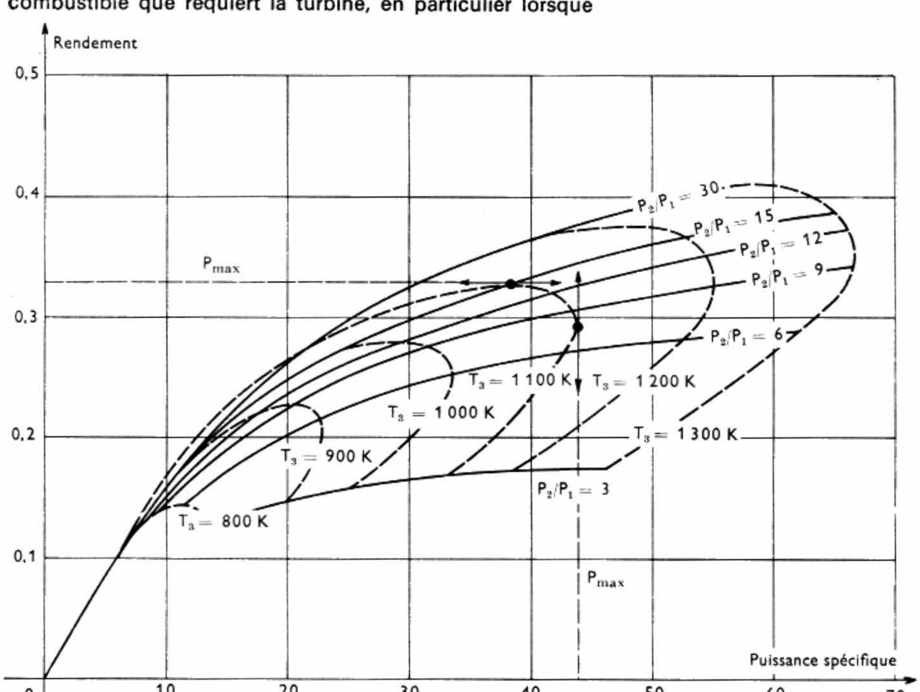


Fig. V-41

Rendement et puissance maximale d'une turbine en fonction du rapport de compression $\frac{P_2}{P_1}$ et de la température des gaz à la sortie de la chambre de combustion

celle-ci doit fonctionner à des régimes tant soit peu éloignés du régime de consommation minimale, la séparation mécanique du générateur de gaz et de la turbine motrice présente un avantage considérable en ce qui concerne le rendement thermodynamique; le rapport de compression d'air, élément déterminant de la valeur du rendement thermodynamique, qui est constant dans le diesel dont la course de piston est constante, varie approximativement comme le carré de la vitesse de rotation du compresseur de la turbine; dans le cas d'une turbine à deux arbres, il peut donc être maintenu au voisinage de sa valeur maximale. Malgré cela, la consommation de combustible reste élevée. On notera que, dans une turbine, le rendement et la puissance spécifique sont liés:

— au rapport de compression, d'une part,

— à la température de l'air admis au premier étage de détente, d'autre part (fig. V-41).

Donc, à chaque température maximale du cycle, correspondent un rapport de compression donnant le rendement maximal et un autre rapport de compression fournissant l'énergie spécifique maximale.

En traction ferroviaire, on préfère ne pas recourir aux températures élevées et gagner sur la longévité de l'ailetage de turbine (en abaissant de 50 °C de la température des gaz on multiplie par dix cette longévité; fig. V-42). On s'évertue également à réduire le nombre dt l'amplitude des chocs thermiques subis par les ailettes de turbine.

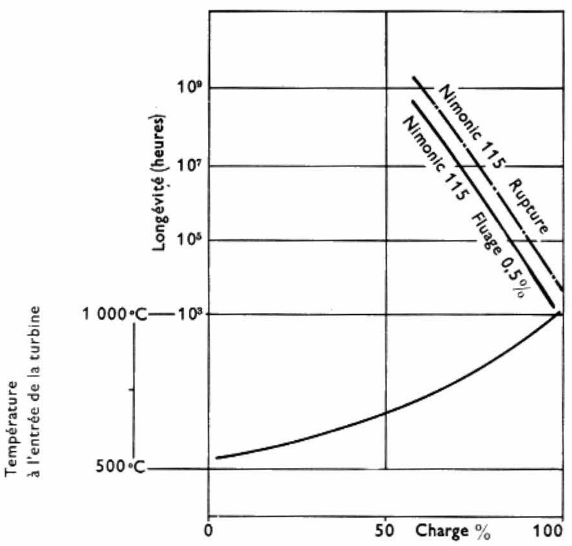


Fig. V-42 — Influence de la charge sur la longévité de l'ailetage de turbine

L'absence d'assemblages frottant à chaud allège certes considérablement les problèmes de lubrification de la turbine et évite un système de refroidissement extérieur lourd et encombrant. Mais pour maîtriser les températures atteintes par les ailettes, il faut diluer dans de l'air froid les gaz sortant de la chambre de combustion et augmenter le débit en masse de l'air à un degré tel que la turbine ne fournit que 130 kW par kilogramme d'air aspiré par seconde alors que le diesel en fournit 600. Il est évident que la compression de cet excès d'air par la turbine, air non directement utile à la combustion, abaisse le rendement mécanique. Par surcroît, la filtration de ce torrent d'air doit être plus poussée que dans le cas du diesel si l'on veut conserver le rendement du compresseur De sérieuses difficultés apparaissent donc fréquemment tant à l'aspiration qu'à l'échappement à l'occasion de l'installation d'une turbine puissante à bord d'un engin ferroviaire, d'autant plus que les dépressions et contre-pressions requises par la turbine sont plus faibles que celles admises par le diesel.

Les importantes vitesses des masses d'air ainsi mises en eu font que la turbine est nettement plus bruyante que le diesel; l'absence de la carapace que constitue l'épaisseur du matelas d'eau de refroidissement entourant les cylindres diesels ajoute une difficulté supplémentaire d'autant plus gênante que, les fréquences sonores de la turbine étant élevées, l'agressivité à l'oreille humaine est intense. Dans le cas d'une turbine, il faut donc (sans méconnaître que les hautes fréquences, qu'elles soient d'ailleurs acoustiques ou thermiques, sont, à amplitudes égales, plus aisément arrêtées que les basses):

— insonoriser les tuyauteries d'admission et d'échappement dont les sections droites sont quatre fois supérieures à celles d'un diesel d'une même puissance,

— enfermer le corps de turbine dans une carapace insonorisante.

La situation de la turbine est évidemment plus aisée lorsqu'il s'agit d'engins d'une puissance de 1 000 kW, de type aéronautique, car alors le volume intrinsèque de la turbine permet une installation facile à bord d'un engin ferroviaire, fût-il d'un maître-couple réduit.

Diesel et turbine à gaz se présentent tous deux dans une situation assez satisfaisante à l'égard des impératifs de la pollution atmosphérique, en soulignant immédiatement que tout phénomène de toxicité doit être envisagé sous deux aspects:

— la quantité de gaz toxique produit par unité de masse de combustible brûlé, d'une part;

— la quantité de gaz toxique présent par unité de volume d'air aspiré par les voies respiratoires, d'autre part.

En conclusion, le moteur à pistons est caractérisé par d'importants déplacements relatifs de pièces déformables appliquées sous forte charge à des niveaux de température où la lubrification risque de devenir limite. Un tel moteur requiert donc les soins d'un personnel d'entretien doué de qualités humaines et techniques, parfois malaisées à coordonner; par surcroît, le diesel, s'il est sobre en combustible, exige une huile de graissage de haute qualité.

La turbine, apparemment plus gracile, souscrit en fait aux impératifs de la résistance mécanique et est affranchie des phénomènes dus aux frottements quasi aléatoires. La turbine se satisfait donc d'un entretien moins diligent, ce qui constitue la raison majeure de sa fiabilité. Mais la puissance que l'on peut lui demander est éminemment fonction de la température extérieure du fait de l'influence de de la température des gaz sur la longévité du service de la turbine, ce qui est très important car la révision générale d'une turbine est financièrement beaucoup plus lourde que celle d'un diesel.

5. LES TRANSMISSIONS

Les limites pratiques d'emploi de la locomotive à vapeur étaient déterminées:

— aux basses vitesses par l'adhérence;

— aux grandes vitesses par la puissance de vaporisation de la chaudière.

Il y avait donc peu de risques qu'une charge remorquée excessive, ou une conduite maladroite de l'engin, entraînât des fatigues dangereuses du mécanisme.

La locomotive électrique, quant à elle, peut transformer une puissance disponible considérable en s'accommodant de surcharges temporaires importantes.

La locomotive diesel ainsi que l'autorail (surtout quand il remorque) subissent une sujétion spécifique du fait que la puissance de leur moteur est strictement limitée à une valeur prédéterminée en fonction du réglage d'organes de régulation. En effet, la transmission et la régulation de l'engin de traction ont pour objet de rendre cette puissance nominale utilisable dans une gamme de vitesses aussi étendue que possible, autrement dit de maintenir pratiquement constant le produit de l'effort par la vitesse. Une difficulté de traction, si minime soit-elle, se traduit donc toujours par une chute de vitesse et, corrélativement, par un fonctionnement du diesel à pleine charge durant un temps variable. D'une part, pour les charges remorquables sur une ligne déterminée par une locomotive diesel donnée selon un horaire fixé, d'autre part, pour le mode de conduite de ces locomotives il faut tenir compte, au premier chef, de ces états de fait.

Les performances dont est capable une locomotive diesel sont fonction de:

— l'effort de traction continu F_M lequel limite la charge maximale qui, compte tenu de l'accélération à imprimer au convoi, peut être démarrée sur une ligne déterminée, le poids adhérent de la locomotive et le coefficient d'adhérence étant fixés;

— l'effort de traction continu F_C, lequel limite la charge maximale remorquable sans limitation de temps sur une section de ligne à profil déterminé;

— la puissance P du diesel qui fixe la vitesse maximale à laquelle une charge donnée peut être remorquée sur une ligne déterminée;

— la vitesse maximale V_M qui fixe la limite supérieure de la vitesse du convoi.

Tout programme d'utilisation d'une locomotive diesel doit fixer ces quatre facteurs, lesquels restent, par ailleurs, parfaitement indépendants les uns des autres.

À titre d'exemple, pour répondre à des conditions différentes, un constructeur fut amené à concevoir les trois locomotives suivantes:

	Projet A	Projet B	Projet C
Puissance (en kilowatts) ...	1 325	1 375	2 450
Masse (en tonnes)	56	103	106
Nombre et disposition des essieux ..	BB	1 CC 1	CC
Effort F_M (10^3 daN)	14	25	27
Effort F_C (10^3 daN)	11	20	21
Vitesse maximale (en kilomètres à l'heure)	88	96	152

Au sein de tout organe qui produit ou transmet de l'énergie, une certaine quantité d'énergie calorifique se dégage. Elle provoque une augmentation de la température, jusqu'à une température d'équilibre θ_1, selon une loi de la forme $(1 - e^{-t/\tau})$ dans laquelle τ, constante de temps, caractérise la durée nécessaire pour atteindre ledit équilibre. Si l'énergie calorifique dégagée est telle que θ_1 est plus élevée que la température maximale admissible par le point intéressé (point quelconque de la structure) le laps de temps durant lequel ladite quantité d'énergie est produite ou transmise doit être limité; ce temps est donc d'autant plus faible que la constante de temps est elle-même plus basse. Cette constante de temps est inversement proportionnelle à la chaleur dégagée par unité de temps et à la diffusivité du matériau objet du flux thermique; cette diffusivité conditionne la progression du flux thermique (équivalent à la progression d'une vague).

Si la conductivité thermique est grande, une faible différence de température entre deux points produit un flux thermique important; si la capacité calorifique γ est faible, un flux très faible provoque une grande différence $\Delta\theta/\Delta t$ en un point quelconque de la structure.

Dans le cas des transmissions, et en fonction des caractéristiques de celles-ci, ces considérations fondamentales fixent la valeur de l'effort de traction continu F_C que l'on peut admettre.

5.1. La relation P = F.V — Nécessité d'une transmission. — Au rendement près de la transmission et dans la mesure où l'on prend la pleine puissance P du diesel, on peut écrire : $P = F.V$ (V désignant la vitesse). On peut tracer l'hyperbole N sur un diagramme (fig. V-43).

On peut tracer également les limites F_M et V_M ainsi que les courbes représentant la résistance à l'avancement du convoi en palier R_0 et en rampe R_p et déterminer les points de fonctionnement.

Du fait de la régulation, si le diesel est limité à une vitesse de rotation inférieure, l'hyperbole N est remplacée par une autre hyperbole N_1, ou N_2, etc.

Mais le diesel ne peut fournir de couple au-dessous d'une certaine vitesse de rotation, car, alors, la combustion

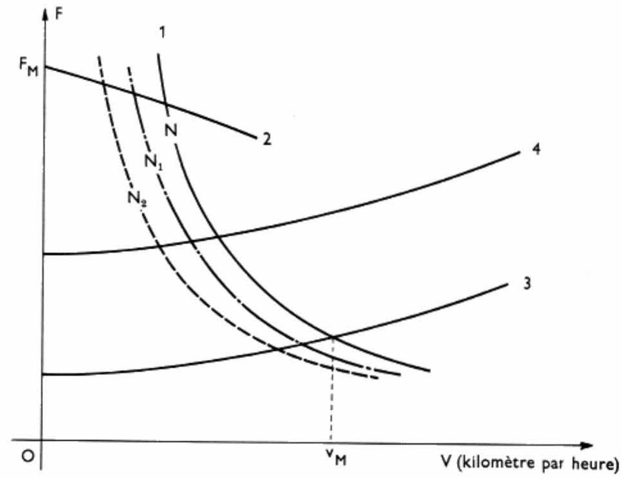


Fig. V-43 — Diagramme général P = F×V
1. N, N_1, N_2: courbes de puissance d'utilisation du diesel. 2. Limite d'adhérence. 3. Résistance en palier R_0. 4. Résistance en rampe R_p

spontanée ne se produit plus: on ne peut donc compter sur les seules caractéristiques du diesel pour couvrir la totalité du contour $OF_M N V_M O$ et il faut introduire entre le diesel et la roue une installation, dite transmission, permettant, au moyen d'organes de glissement et de démultiplication variable, de couvrir la totalité de ce contour en utilisant une fraction aussi grande que possible de la puissance que peut offrir le diesel.

Cette transmission doit, par surcroît, être d'un rendement élevé, permettre une montée en vitesse progressive, être légère et peu encombrante et présenter les qualités supplémentaires suivantes:

— rapport élevé entre le couple au démarrage et le couple à la vitesse maximale, tous deux exercés sur l'essieu pour la pleine puissance du diesel (un rapport de 5/1 suffit pour les autorails non destinés à remorquer, un rapport de 10/1 est nécessaire pour une locomotive); ainsi la transmission fournit aux essieux une puissance constante dans la plus grande gamme de vitesses possibles;

— point de fonctionnement continu à la vitesse la plus faible possible, ce qui introduit une nécessité de refroidissement;

— fonctionnement dans les deux sens de marche.

Les transmissions utilisées en traction ferroviaire appartiennent à trois familles distinctes: mécanique, hydraulique et électrique.

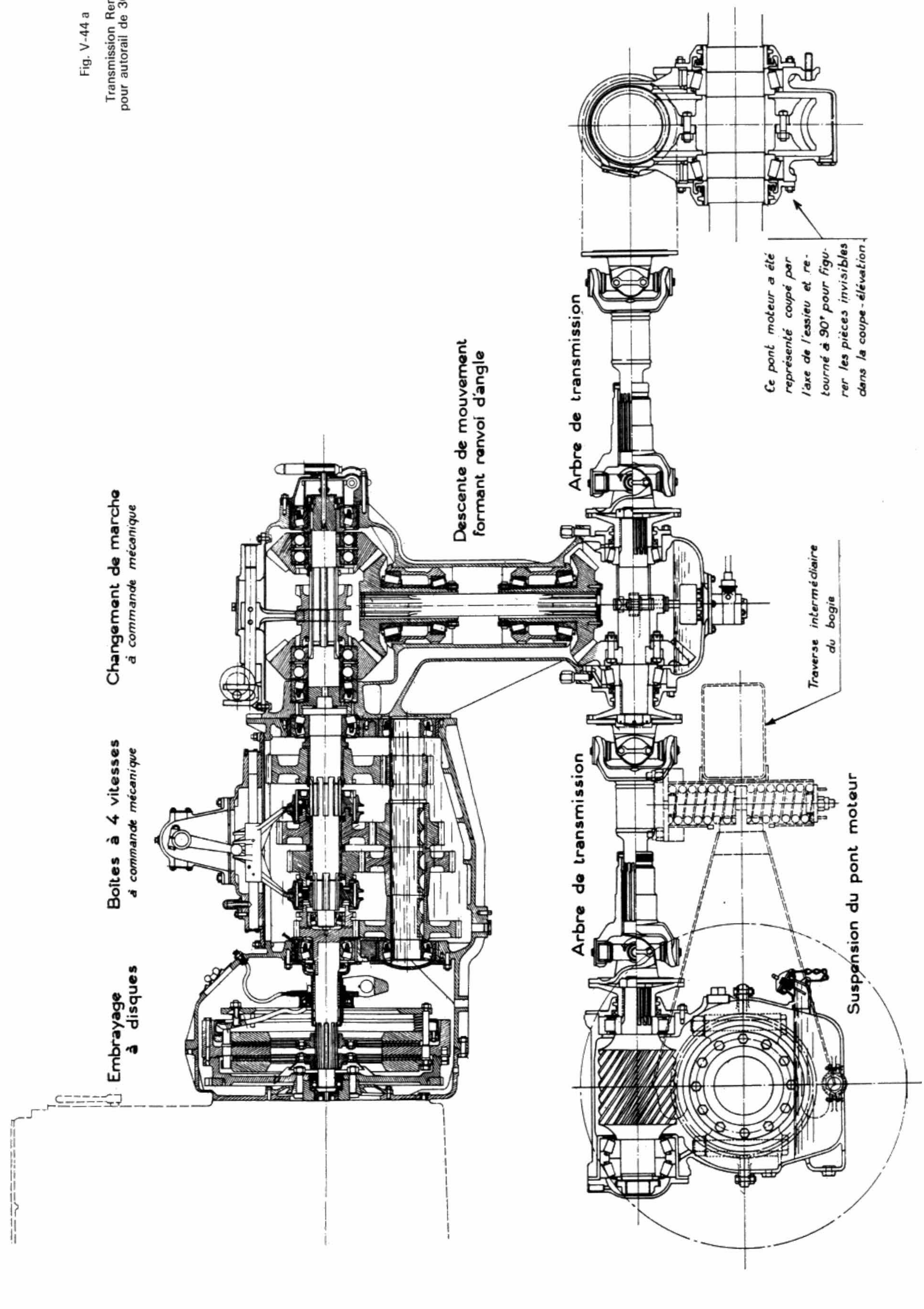
5.2. Transmissions mécaniques. — Analogues dans leur principe aux transmissions d'automobile, elles possèdent en supplément un inverseur de marche, généralement installé dans le carter de la boîte (fig. V-44). Plus faible est le nombre d'étages de vitesse, plus la caractéristique de traction est éloignée de l'hyperbole $F.V = $ Cte. Pour chaque rapport de démultiplication la courbe de l'effort à la jante en fonction de la vitesse de l'engin est le reflet, à l'échelle près donnée par le rapport de transmission, de la courbe de couple du moteur en fonction de sa vitesse (fig. V-45). Pour une même courbe de résistance à l'avancement, la vitesse de circulation est V_1 et non V.

Les transmissions mécaniques possèdent un rendement supérieur à celui des transmissions électriques et hydrauliques; elles améliorent donc très sensiblement la puissance massique à la jante et allègent considérablement les installations de refroidissement. Leur poids et leur encombrement sont très avantageux.

Pour les engins à faible vitesse de circulation, 4 étages sont, suffisants en général; lorsque la vitesse V_M doit dépasser 50 km/h, il faut prévoir 6 ou 8 étages. Pour les engins de manœuvre de faible puissance massique, la vitesse au sommet du premier étage doit être voisine de 5 km/h afin de permettre le triage par gravité en utilisant la pleine adhérence. Pour les engins de ligne la vitesse au

Fig. V-44 a

Transmission Renault pour autorail de 300 ch



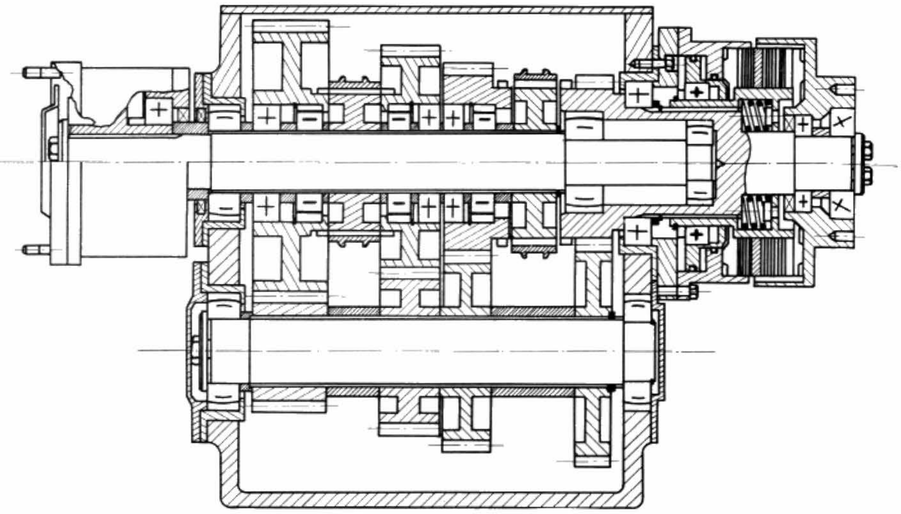


Fig. V-44 b
Boîte « Asynchro »
4 vitesses, sans inverseur

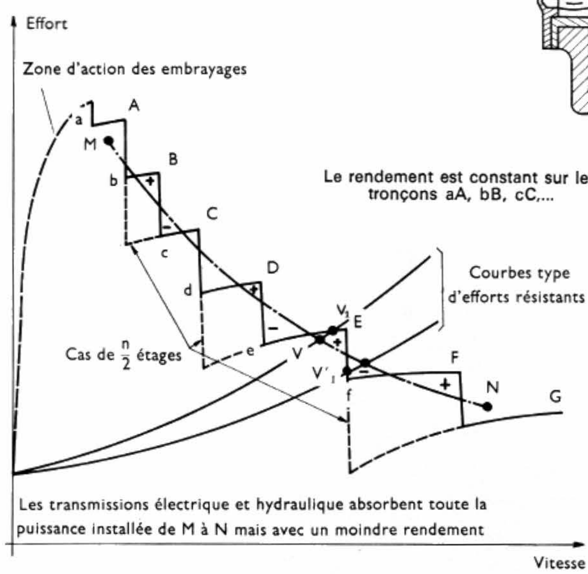


Fig. V-45 — Diagramme F = f(V) d'une transmission mécanique. Suivant le cas, la vitesse de circulation V_1, V'_1, etc., est supérieure ou non à la vitesse V en transmissions électrique ou hydraulique

sommet du premier étage est généralement déterminée par le souci de limiter le temps de glissement de l'embrayage lors des démarrages : elle est donc proche de 15 km/h pour les locomotives et voisine de 25 km/h pour les autorails.

L'effort développé au maximum de la première vitesse constitue, en fait, l'effort de traction continu F_C de la transmission. Le rendement étant excellent, les problèmes thermiques ne se posent pratiquement jamais.

Lorsque la puissance de traction dépasse 200 kW, de sérieuses difficultés apparaissent au niveau de l'embrayage mécanique à friction et au niveau des synchroniseurs, du fait de l'importance des inerties mises en jeu. À l'embrayage mécanique on adjoint alors un coupleur hydraulique. (V. ci-après.) Du fait de leur possibilité de glissement, ces coupleurs soulagent l'embrayage mécanique qui n'a plus à jouer le rôle d'organe glissant, siège d'échauffements importants. On peut également remplacer l'embrayage à friction par un coupleur hydraulique à quantité d'huile variable (coupleur à écope).

La difficulté de transmettre de grandes puissances à l'aide de boîtes de vitesses mécaniques ne provient pas des engrenages. Convenablement dimensionnés, ils ne connaissent pas de limite autre que celle de la vitesse périphérique des dentures, les dimensions linéaires devant être augmentées dans le rapport

$$k = \sqrt[3]{\frac{P_1}{P_0}}$$

En réalité, elle provient de la difficulté d'accoupler, lors des changements de combinaison, des pignons qui, présentant des vitesses relatives importantes, possèdent des inerties considérables. Au-dessus d'une certaine dimension de pignon, le volume des synchroniseurs devient inacceptable. En effet, un synchroniseur absorbe essentiellement une variation d'énergie cinétique, c'est-à-dire un travail proportionnel au produit du moment d'inertie I par le carré de la variation de vitesse angulaire des masses à accorder ; ce travail, variant comme I, varie comme la puissance cinquième d'une longueur. On démontre que si les dimensions des engrenages sont multipliées par le facteur k, celle des synchroniseurs doivent être multipliées par le rapport $k^{5/3}$. Très rapidement le synchroniseur est plus grand que le pignon à synchroniser, et, finalement, il impose à celui-ci une dimension, donc une inertie, inutilement élevée.

En plus des classiques boîtes à présélection de vitesses (Wilson, Mylius, etc.) utilisées sur les autorails de conception antérieure à 1940, deux dispositifs originaux nouveaux, dépourvus de synchroniseurs, sont en service à la S.N.C.F. :

— la boîte de vitesse De Dietrich, équipant les éléments automoteurs, comporte 3 arbres avec 9 roues dentées toujours en prise ; les combinaisons utiles pour réaliser les 8 étages de vitesses sont obtenues à l'aide de 4 embrayages commandés pneumatiquement et de 2 roues libres ;

— la boîte de vitesse Asynchro, équipant les locotracteurs unifiés, est munie, à l'entrée, d'un embrayage-frein à disque remplaçant les synchroniseurs, et, à sa sortie, d'une roue libre. C'est une boîte à 8 vitesses dont le changement de combinaison s'opère sur engrenages arrêtés. Deux boîtes de ce type équipent la locomotive à 2 diesels de 1 300 kW (construite par les Ateliers de Montmirail) qui assure pour la S.N.C.F. un trafic de grande ligne voyageurs et marchandises.

5.3. Transmissions hydrauliques

5.3.1. Transmissions hydrocinétiques. — Dans le domaine de la traction ferroviaire, on utilise essentiellement des transmissions dont les éléments de base sont un coupleur et un convertisseur de couple.

Un coupleur est constitué de deux demi-tores creux (fig. V-46), à cloisons planes radiales, montées l'un sur l'arbre primaire lié au moteur et l'autre sur l'arbre secondaire lié à l'organe mené. Un carter, solidaire de l'une des deux parties, forme enveloppe et contient l'huile qui, mise en mouvement par la rotation du primaire, circule dans les aubages sous l'effet de l'inertie centrifuge et passe dans la couronne réceptrice qu'elle entraîne. Le remplissage en huile n'est pas total afin d'éviter les surpressions. Les cloisons sont en nombres inégaux (26 et 27 par exemple) pour éviter les coïncidences.

La vitesse de rotation du secondaire est toujours inférieure à celle du primaire ; le glissement g égal à 100 % lors du démarrage, s'établit à 2 ou 3 % dans les conditions normales d'utilisation. Le rendement est égal à : $(1 - g)$. Le couple à la sortie est toujours égal au couple moteur.

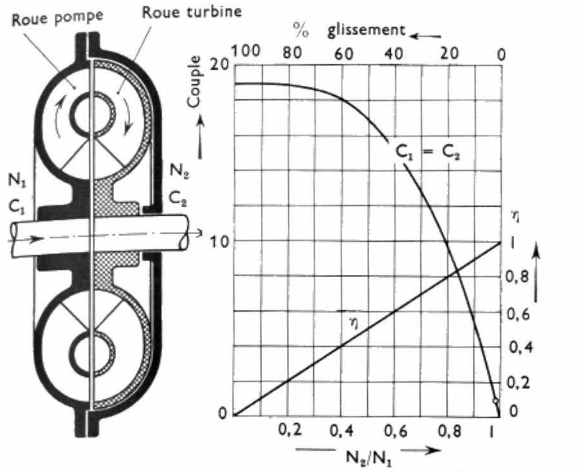


Fig. V-46 — Section schématique d'un coupleur hydraulique et courbes des caractéristiques. C_1 : couple primaire à l'entrée ; C_2 : couple secondaire à la sortie ; N_1 : vitesse constante à l'entrée ; N_2 : vitesse à la sortie ; η : rendement

Un convertisseur de couple (fig. V-46) comporte trois groupes d'aubages :

— une pompe (ou impulseur) liée à l'arbre moteur ;

— une turbine (ou récepteur) liée à l'organe mené ;

— des aubages fixes (ou de réaction) formant stator ou réacteur.

Comme dans le coupleur, il y a circulation méridienne d'huile, mais la direction des aubes de la roue turbine n'est plus radiale : la direction du flux d'huile est déviée dans un sens contraire à celui qu'elle avait à l'entrée et cette déviation, qui crée un important ralentissement de la masse liquide, provoque l'apparition d'un couple appliqué à la turbine ; au démarrage, il est plusieurs fois supérieur au couple moteur. Lorsque la turbine tourne, le changement de direction du flux liquide et, en conséquence, le ralentissement de la masse liquide, devient de moins en moins grand ; au fur et à mesure que la vitesse de la turbine augmente, le couple récepteur diminue jusqu'à devenir nul au glissement nul.

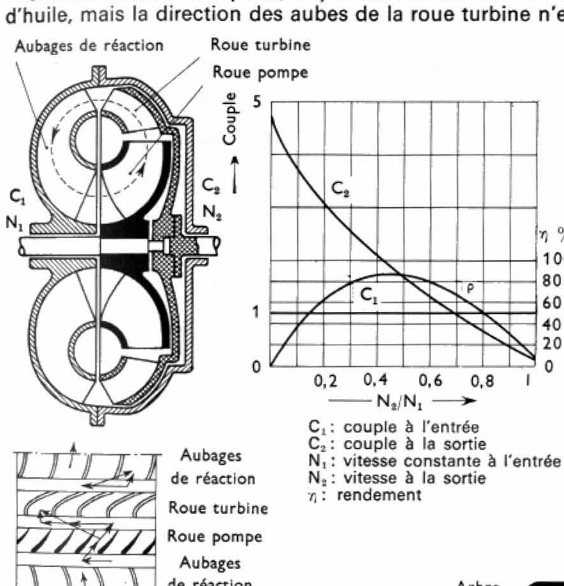


Fig. V-47

Section schématique d'un convertisseur hydraulique. Courbes des caractéristiques. Schéma des aubages

Le rôle des aubages réacteurs est de reprendre les filets fluides qui, à la sortie turbine, sont de direction extrêmement variable (fonction de la vitesse de rotation de celle-ci) et de les renvoyer sous un angle constant, à l'entrée de la pompe ; durant son séjour dans les aubages de réaction, le fluide exerce donc sur ceux-ci un couple égal à la différence entre le couple moteur et le couple récepteur ; au-delà d'une certaine vitesse du secondaire, les filets fluides attaquent les aubages de réaction par l'extrados et le couple exercé change de signe.

Les convertisseurs de couple sont conçus pour fournir, au démarrage, un couple sur l'arbre de sortie de trois à cinq fois supérieur au couple moteur ; le diesel fonctionnant à plein couple, sa vitesse varie peu lorsque le train accélère mais le rapport entre les couples primaire et secondaire diminue.

Le rendement du convertisseur varie avec le rapport des vitesses d'entrée et de sortie. Il peut atteindre 90 % si l'on ne tient pas compte de la puissance absorbée par la pompe qui a pour mission de maintenir dans le compresseur une pression de quelques bars (pour éviter la cavitation) et d'assurer la circulation de l'huile dans un radiateur de refroidissement. Le rendement maximal est généralement obtenu lorsque le rapport ci-dessus est voisin de 0,5, rapport pour lequel la circulation de l'huile s'effectue sans chocs aux entrées et sorties.

Une transmission hydrocinétique d'engin ferroviaire (fig. V-48) est constituée par la juxtaposition de convertisseurs et de coupleurs qui entrent successivement et automatiquement en action à des vitesses étagées bien déterminées, l'huile de l'organe mis hors service étant vidangée et réintroduite dans l'organe mis en fonctionnement. La combinaison des caractéristiques correspondant à chacun d'eux donne, en définitive, une caractéristique $F = f(V)$ qui se rapproche de très près de l'hyperbole d'utilisation idéale (fig. V-49).

Diverses transmissions conjuguent les caractéristiques des transmissions mécanique et hydrodynamique, en plaçant un convertisseur de couple en tête d'une boîte de vitesses, l'ensemble étant contenu dans une même enceinte. La plus répandue des transmissions hydromécaniques est la transmission Mekydro (fig. V-50) dont le convertisseur possède la particularité d'avoir une roue turbine qui peut

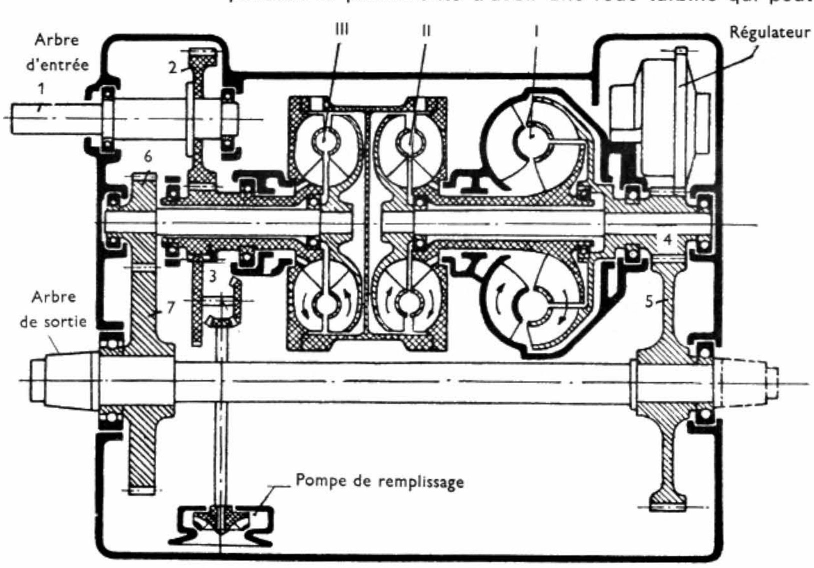


Fig. V-48

Transmission hydraulique « Voith » comprenant un convertisseur et deux coupleurs

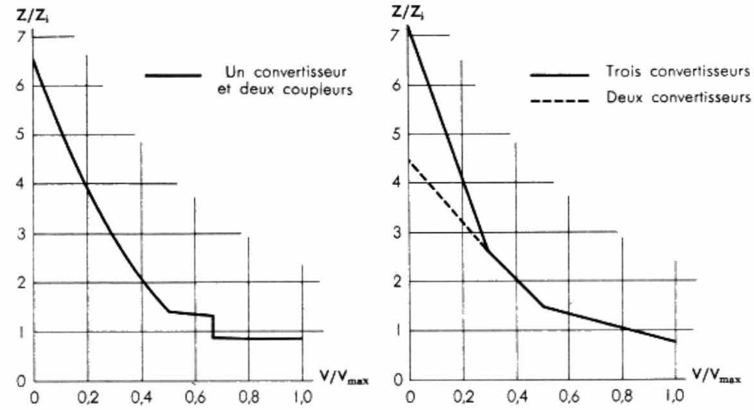


Fig. V-49 — Transmissions hydrauliques à combinaisons (convertisseur+coupleur) différentes: courbes montrant la variation de l'effort de traction en fonction de la vitesse
Z: effort de traction correspondant à la vitesse d'utilisation V
Z_i : effort de traction théorique correspondant à la vitesse V_{max} et à la puissance maximale du moteur

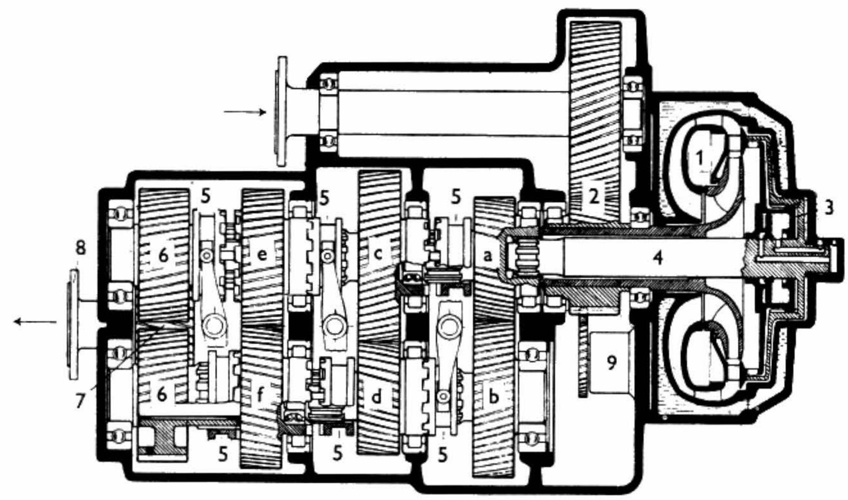


Fig. V-50

Boîte de transmission Mekydro
1. Convertisseur de couple
2. Multiplicateur
3. Cylindre à huile actionnant le déplacement axial de la turbine
4. Axe secondaire
5. Crabots
6. Inverseur de marche
7. Roue secondaire de l'inverseur de marche
8. Arbre de sortie
9. Pompe à engrenage de distribution d'huile aux organes de la boîte

a à f: Roues à engrenages de la boîte de vitesses

être déplacée axialement et mise hors circuit donc jouer un rôle d'embrayage. La roue turbine comporte également un second aubage, mis en circuit lorsque le premier est effacé, qui fournit un léger couple négatif assurant la synchronisation des éléments à accoupler.

Il faut également mentionner la transmission Suri expérimentée par les Chemins de fer de l'Inde, pays dans lequel il est capital de limiter la consommation de combustible. Cette transmission comprend essentiellement, en parallèle, un circuit hydraulique qui permet de développer l'effort de traction nécessaire au démarrage et un circuit purement mécanique (du type Mekydro, par exemple) normalement disposé pour entrer en action à 70 % de la vitesse maximale. La couronne d'aubages de réaction du convertisseur hydraulique est montée sur une roue libre, l'action dynamique du fluide établissant donc automatiquement le passage convertisseur-coupleur pour chacune des conditions de charge en fonction de la vitesse.

L'huile des transmissions hydrocinétiques doit être refroidie par circulation forcée au sein de radiateurs. Mais du fait que la quantité de chaleur dégagée peut être importante (le rendement étant mauvais à basse vitesse), que les radiateurs sont relativement éloignés du lieu où se produit le dégagement de chaleur, que l'huile a une faible inertie thermique du fait de sa faible capacité calorifique, une importante augmentation de température peut être provoquée, soit lors de surcharges, soit par fonctionnement à faible vitesse, c'est-à-dire à mauvais rendement. En conséquence, au démarrage de trains lourds, la température de l'huile monte de plusieurs degrés Celsius par seconde, gradient d'autant plus important que la quantité d'huile mise en jeu est plus faible. Plus grande est la puissance massique à la jante de l'engin de traction, moins vulnérable est la transmission hydraulique. En vitesse, le rendement étant meilleur, ainsi que les conditions d'échange thermique, ces difficultés disparaissent.

5.3.2. Transmissions hydrostatiques. — Ces transmissions comprennent:

— Une pompe volumétrique à pistons multiples directement entraînée par le moteur Diesel; ces pistons montés en barillet tournant peuvent, pour une vitesse de rotation constante du diesel, fournir un débit variable.

— Un ou plusieurs moteurs hydrauliques volumétriques de cylindrée constante, liés chacun à un essieu moteur.

— Des canalisations de liaison.

La puissance transmise est égale (au rendement près) au produit du débit d'huile par la pression régnant au sein de cette huile. Le débit fourni par la pompe fixe la vitesse de rotation du moteur hydraulique; le couple résistant appliqué à ce moteur fixe la pression P régnant au sein du volume d'huile refoulé par la pompe; le couple d'un moteur hydraulique de cylindrée égale à q dm³ par tour est $\mathcal{C} = 1,59\ q\ P$ (en mètres-décanewtons).

Pour que le fonctionnement de la pompe soit régulier, le barillet doit tourner rigoureusement en phase avec l'arbre de puissance sur lequel est fixé le plateau de bielles d'entraînement des pistons; son entraînement doit donc être assuré par un cardan (lequel transmet moins de 5 % du couple maximal) qui soit parfaitement homocinétique.

De telles transmissions hydrostatiques ont, d'origine, équipé des engins lourds de travaux publics et des tracteurs de piste d'aérodrome. Elles se différencient des transmissions hydrocinétiques par le fait fondamental que, les vitesses de déplacement du fluide étant faibles, l'énergie cinétique du fluide est négligeable et, en conséquence, les pertes internes minimes. Les difficultés technologiques à surmonter furent d'assurer les étanchéités et la tenue des canalisations de liaison aux pressions élevées qu'engendrait la transmission de puissances notables. Les puissances actuellement transmises dépassent 1 000 kW.

Le rendement global se situe à 92 % ; l'échauffement de l'huile étant très faible, les pertes calorifiques dues au frottement ne dépassent pas 2 % et les organes de dissipation de chaleur s'avèrent inutiles.

La régulation de transmission de puissance est simple du fait de la conjugaison des deux impératifs de grande pression à faible vitesse et de grand débit à grande vitesse. Le débit de la pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du diesel ; la pression hydraulique, croissant en fonction du couple résistant, fixe le couple fourni par le diesel ; lorsque le point représentatif du fonctionnement atteint la caractéristique couple — vitesse du diesel, le débit de la pompe, asservi au dispositif d'injection, est automatiquement réduit.

L'indépendance matérielle de la pompe et des moteurs évite que toute aberration fonctionnelle fortuite (patinage, blocage, etc.) n'entraîne une perturbation généralisée du comportement.

Ces transmissions hydrostatiques peuvent fonctionner à puissance constante sur une gamme de vitesses du récepteur très étendue et présentent une réelle souplesse d'utilisation. Leur mise en œuvre est facilitée du fait que les canalisations de liaison entre pompe et moteurs sont de faible diamètre et peuvent être souples et que le rapport $\frac{\text{masse globale de transmission}}{\text{puissance transmise}}$ est voisin de 1 kg/kW.

Mais la réalisation d'une installation requiert une sérieuse qualification professionnelle.

5.4. Transmissions électriques

5.4.1. Technologie. — Une transmission électrique est essentiellement constituée :

— d'un générateur entraîné à vitesse variable ou constante par la machine thermique,

— de moteurs de traction à excitation série disposés dans les bogies et alimentés sous tension variable par le générateur,

— éventuellement, d'un dispositif de conversion de courant inséré entre générateur et moteur.

Les fonctions de base auxquelles doit souscrire la transmission sont obtenues de façon simple en réglant la tension d'alimentation des moteurs de traction par action sur le courant d'excitation du générateur. La transmission est elle-même conçue pour fonctionner à puissance constante pour chaque niveau de puissance du diesel, c'est-à-dire à produit $U.I$ constant. (U : tension délivrée par le générateur ; I : intensité du courant absorbé par le moteur).

Le générateur offre une caractéristique $U(I)$ telle que la courbe 1 (fig. V-51), tandis que le diesel fournit une caractéristique telle que la courbe 2, hyperbole d'équipuissance, pour une vitesse de rotation déterminée. Pour que le générateur ne surcharge pas le moteur entre A et B, un système de régulation est utilisé : l'excitation du générateur est placé sous la dépendance du régulateur du moteur Diesel (ainsi, sur le graphique, l'aire hachurée est supprimée).

Pendant longtemps, ce générateur fut une génératrice à courant continu, généralement autoventilée et à trois excitations (en dérivation, séparée et anticompound). Mais au-dessus d'une certaine valeur du produit de la puissance par la fréquence de rotation, c'est-à-dire pour les locomotives équipées d'un diesel rapide et puissant, on ne peut conserver cette technique. En effet, une machine à collecteur, supposée à enroulement parallèle simple (chaque conducteur d'induit étant donc parcouru par la fraction $\frac{1}{2p}$ du courant total, $2p$ étant le nombre de pôles) fournit une puissance P égale à :

$$P = \frac{\pi}{2} \cdot e_m \cdot I_a \cdot D$$

si l'on appelle :

e_m : la tension moyenne entre lames ;
I_a : l'intensité du courant par unité de longueur périphérique d'induit ;
D : le diamètre de l'induit.

Le produit de la puissance par la fréquence de rotation est donc égal à :

$$P.n = \frac{1}{2} \cdot e_m \cdot I_a \cdot V_i$$

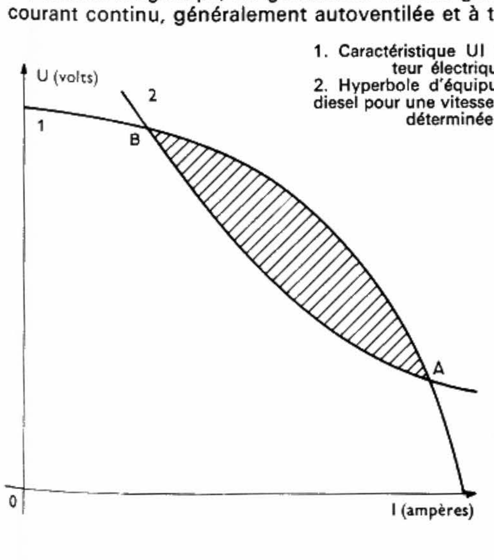
V_i étant la vitesse périphérique de l'induit,

soit à :
$$P.n = \frac{\lambda}{2} \cdot e_m \cdot I_a \cdot V_k$$

V_k étant la vitesse périphérique du collecteur, et λ le rapport du diamètre de l'induit et du diamètre du collecteur.

Étant donné que les valeurs maximales admissibles pour ces 4 paramètres sont respectivement 1,4 à 1,5, 18 à 20 volts, 50 à 60.10^3 ampères par mètre d'induit et 50 à 60 m/s, on aboutit à la valeur limite $P.n = 2{,}7 \times 10^6$ (avec P en kilowatts et n en tours par minute), soit 1 800 kW pour une génératrice tournant à 1 500 tr/mn et 2 700 kW pour une génératrice à 1 000 tr/mn. Pour des puissances plus grandes, il faut utiliser des génératrices à enroulement parallèle double (comme sur les locomotives 68000 de la S.N.C.F.) mais le bobinage devient alors compliqué, donc cher, et la commutation délicate. La technique des redresseurs statiques a permis, depuis plusieurs années, d'alimenter les moteurs de traction en courant ondulé sans que leur utilisation en soit limitée. Leur présence a donc permis d'affranchir la génératrice de son redresseur mécanique, le collecteur, et d'adopter comme générateur de courant un alternateur. Cette solution, si elle présente l'inconvénient sérieux de ne pas permettre de lancer électriquement le moteur Diesel, offre d'incontestables avantages de prix, de poids, de rendement, d'entretien ; de plus il est ainsi possible d'assurer le chauffage électrique du train, donc de libérer la locomotive de la chaudière de chauffage par vapeur sous pression.

Les moteurs de traction sont toujours à courant continu car ceux-ci restent les seuls à pouvoir supporter à l'arrêt des courants intenses sans destruction de balais. À ce sujet on peut rappeler que plus la charge à démarrer est importante, plus faible doit pouvoir être l'accélération dans des conditions d'adhérence fixées ; si dans le cas de moteurs



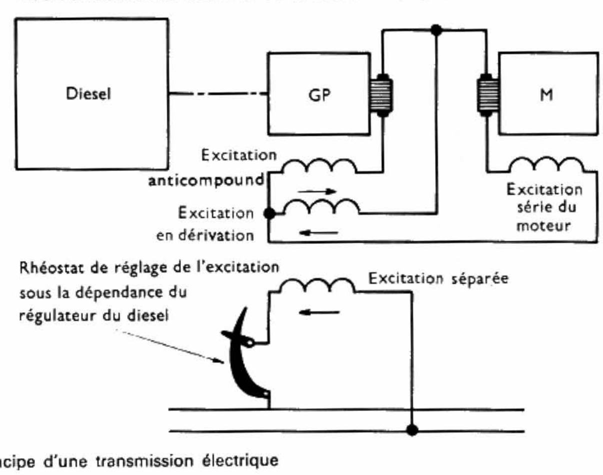
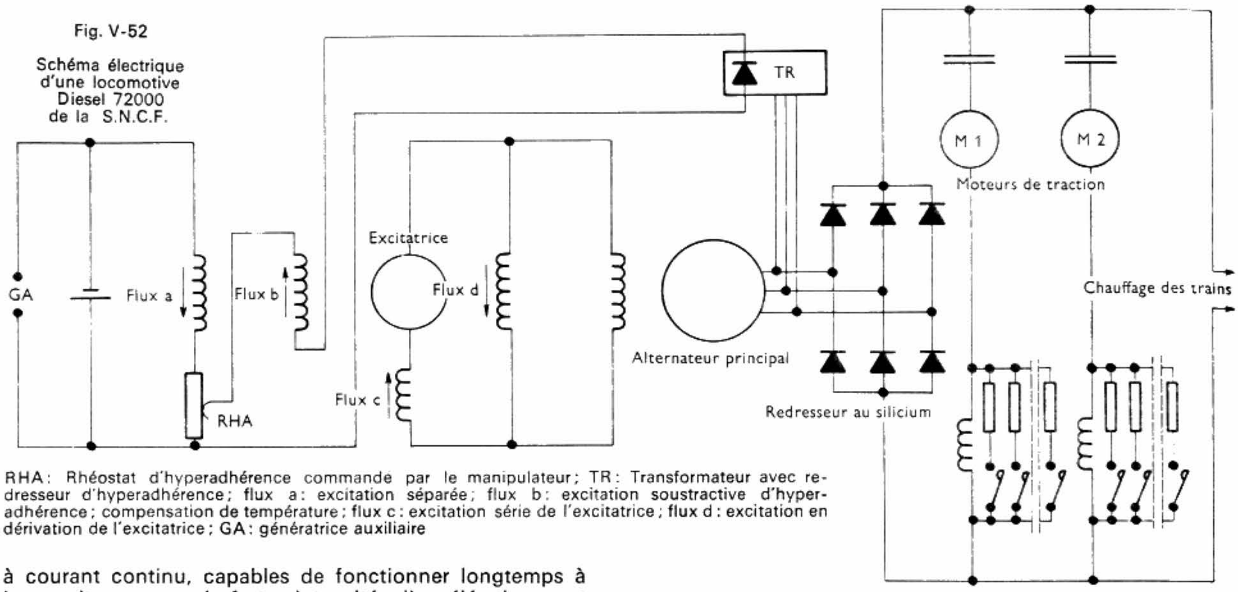


Fig. V-51 — Principe d'une transmission électrique

Fig. V-52

Schéma électrique d'une locomotive Diesel 72000 de la S.N.C.F.



RHA : Rhéostat d'hyperadhérence commande par le manipulateur ; TR : Transformateur avec redresseur d'hyperadhérence ; flux a : excitation séparée ; flux b : excitation soustractive d'hyperadhérence ; compensation de température ; flux c : excitation série de l'excitatrice ; flux d : excitation en dérivation de l'excitatrice ; GA : génératrice auxiliaire

à courant continu, capables de fonctionner longtemps à basse vitesse avec de fortes intensités, l'accélération peut être voisine de 2 cm/s² (soit 4,3 km/h par minute). Avec les moteurs monophasés à collecteur, en revanche, la commutation est défectueuse à basse vitesse et il faut être assuré d'une accélération de 10 cm/s². Dans les moteurs à courant continu et à excitation série, les efforts exercés à la jante dépendent uniquement des intensités des courants absorbés.

Ces moteurs attaquent chacun un essieu par pignon et engrenage calé sur l'essieu ; ils sont généralement suspendus par le nez, c'est-à-dire que d'un côté ils reposent sur l'essieu au moyen de coussinets et que de l'autre ils sont fixés élastiquement au châssis de bogie. Suivant leur nombre et leurs caractéristiques, ces moteurs sont branchés soit en parallèle, soit en série-parallèle (fig. V-52 et V-53).

Les inducteurs de ces moteurs sont shuntés par une résistance à partir d'une certaine vitesse ; la diminution du champ inducteur ainsi réalisée permet aux moteurs d'absorber un courant plus intense. On rappellera que la tension et l'intensité du courant fourni aux moteurs de traction varient respectivement comme la vitesse et l'effort de traction de la locomotive.

L'expérience des locomotives électriques et le souci de diminuer les masses non suspendues d'engins circulant à grande vitesse incitèrent à l'emploi de bogies monomoteurs dans lesquels le moteur de traction, entièrement fixé au châssis de bogie donc suspendu, attaque les deux ou trois essieux par train d'engrenages et transmission élastique. Cette disposition offre l'avantage de permettre, par changement du rapport de réduction des engrenages, de passer du régime « voyageurs » au régime « marchandises » ; cela conduit à un dimensionnement du moteur pour le seul régime voyageurs, c'est-à-dire pour la masse la plus faible. De plus, du fait de la liaison mécanique entre essieux moteurs, le coefficient d'adhérence des locomotives est accru. Toutefois ces moteurs de traction débordent à l'intérieur de la caisse déjà très encombrée et cela impose de ménager une grande ouverture au droit de la section où est appliqué l'effort tranchant maximal.

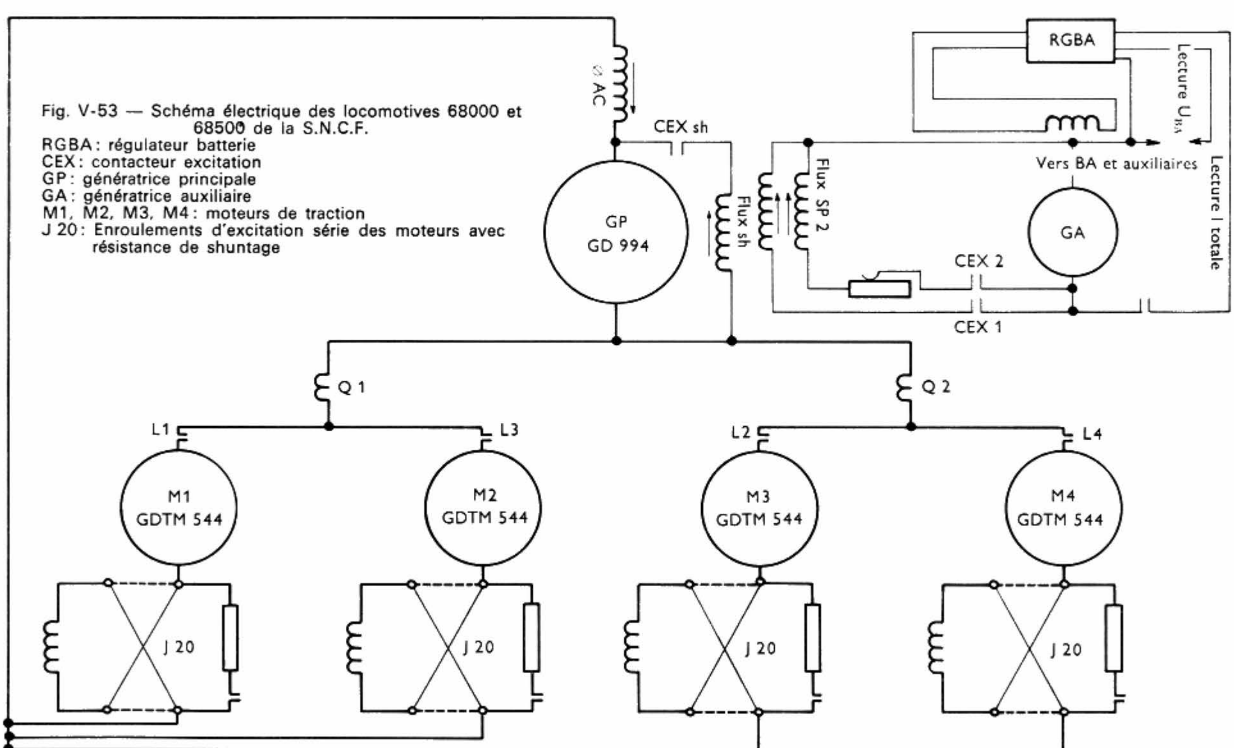


Fig. V-53 — Schéma électrique des locomotives 68000 et 68500 de la S.N.C.F.
RGBA : régulateur batterie
CEX : contacteur excitation
GP : génératrice principale
GA : génératrice auxiliaire
M1, M2, M3, M4 : moteurs de traction
J 20 : Enroulements d'excitation série des moteurs avec résistance de shuntage

Les moteurs de traction doivent être énergiquement refroidis. Pour un certain couple moteur, c'est-à-dire pour un certain taux d'émission d'énergie calorifique, la température d'équilibre θ_1 est, en effet, fonction de la chaleur éliminée par unité de temps, c'est-à-dire de la ventilation ; dans certaines conditions de ventilation on peut déterminer le couple tel que la température d'équilibre ne dépasse pas la température θ_m correspondant à la durée de vie infinie des isolants des moteurs. Pour une certaine valeur θ_m l'accroissement de la ventilation permet, tout en conservant le principe du régime continu, d'accroître le taux d'émission, donc le couple moteur, la réduction de la constante de temps étant théoriquement secondaire. En réalité la locomotive est utilisée à régime variable et on perçoit, dans ces conditions, l'intérêt de permettre de dépasser l'effort correspondant au régime continu pendant un temps tel que la température θ_m des isolants ne soit pas dépassée. Il est évident que lorsque le gradient d'échauffement croît, la constante de temps diminue ainsi que la période durant laquelle on peut admettre la surcharge. Dans le cas d'une transmission électrique, il est relativement aisé :

— d'accroître θ_m en modifiant les qualités mécaniques et électriques des isolants sans modifier la constante de temps τ ;

— de réduire θ_1 en augmentant la ventilation ce qui, pratiquement, conduit à une réduction de τ.

L'amélioration de la qualité de l'isolant permet donc, qu'il y ait ou non accroissement de la ventilation, d'augmenter le taux de surcharge durant un temps plus bref (fig. V-54).

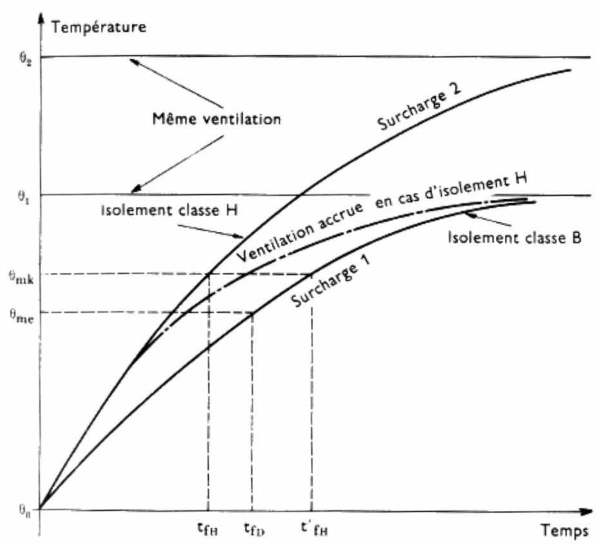


Fig. V-54 — Surcharges de transmissions électriques

Au total, l'échauffement interne est lent, environ 0,1 °C par seconde, et les sujétions inhérentes au démarrage de trains lourds sont pratiquement inexistantes ; seuls sont à prendre en considération les échauffements à faible vitesse consécutifs à des surcharges de quelque durée.

5.4.2. La régulation : son influence sur les qualités d'adhérence. — La régulation de la puissance $P = F.V$, sur la plus grande gamme possible, est assurée :

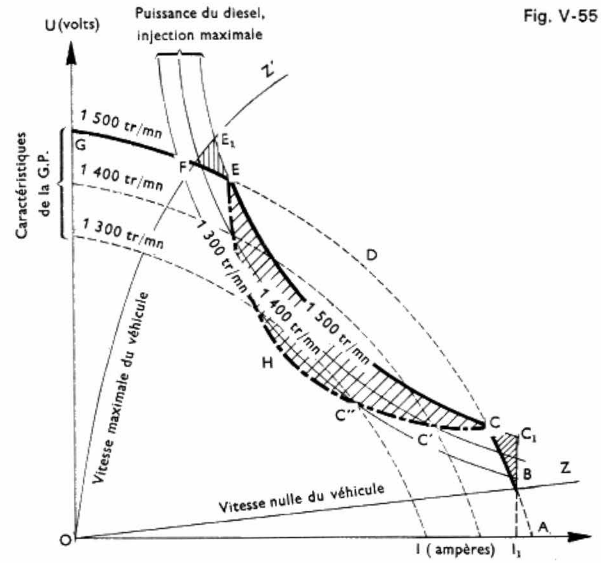
— par un choix judicieux des caractéristiques d'excitation de la génératrice (généralement trois enroulements : en dérivation, séparé et série anticompound) et des conditions d'alimentation de ces enroulements ; c'est la régulation interne, simple mais insuffisante ;

— par l'action du régulateur du moteur Diesel sur un rhéostat agissant sur l'excitation séparée du générateur : c'est la régulation externe.

Le conducteur de l'engin commande, grâce à son manipulateur, la vitesse de rotation du diesel en agissant sur la position de la butée du ressort du régulateur équipant ledit moteur. La quantité de combustible introduite par cycle est ajustée par ce régulateur à une valeur telle que le couple moteur soit, à la vitesse de rotation imposée, égal au couple résistant.

Mais les deux caractéristiques naturelles de couple fonction de la vitesse du diesel et du générateur ne sont pas confondues : la régulation externe a donc pour objet d'adapter, pour chaque position du manipulateur, la caractéristique de fonctionnement du générateur en charge à la puissance utile fournie par le diesel (lequel entraîne également des auxiliaires : compresseur d'air, ventilateur des radiateurs, etc., à fonctionnement intermittent).

Fig. V-55



On peut rassembler sur un même diagramme (fig. V-55) les caractéristiques de puissance constante du diesel et du générateur et les caractéristiques *OZ* et *OZ'* représentant la tension aux bornes des moteurs de traction à l'arrêt et à la vitesse maximale. Au démarrage, le point de fonctionnement est en *B* ; puis au fur et à mesure que le train prend de la vitesse, le diesel étant supposé tourner à vitesse constante, le point de fonctionnement décrit successivement :

— la courbe *BC* : on ne peut alors utiliser la puissance que le diesel pourrait fournir car la caractéristique de la génératrice ne le permet pas ;

— la courbe *CE* : la génératrice peut maintenant absorber une puissance supérieure à celle que peut fournir le diesel ; la vitesse de celui-ci diminue donc et le point de fonctionnement naturel viendrait en *C'*, *C''*, etc., si la régulation externe ne corrigeait pas l'excitation du générateur de façon à diminuer la puissance que celui-ci est susceptible d'absorber, évitant ainsi le ralentissement du groupe électrogène donc la perte de puissance en résultant. Avec un système de régulation parfait, les points de fonctionnement restent sur l'hyperbole *CE* du diesel (on « gagne » ainsi toute la zone hachurée entre la courbe *CHE* et ladite hyperbole).

Au-delà de *E*, la tension est à nouveau limitée par la caractéristique du générateur et l'on ne peut utiliser la puissance diesel développable.

On a évidemment intérêt à rapprocher les points *C* et *E* des points C_1 et E_1.

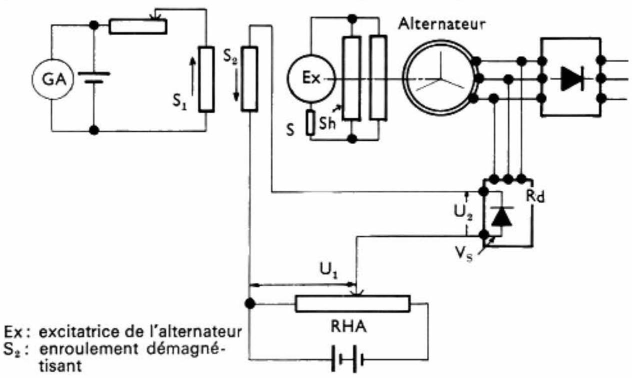
Cette condition de développer la pleine puissance étant assurée, en transmission électrique il est possible de réaliser la condition supplémentaire d'utiliser au mieux les conditions d'adhérence roue sur rail en évitant tout patinage dynamique, la stabilité dynamique décroissant fondamentalement lorsque la vitesse croît (puisque, du fait de l'hyperbole, $\frac{dF}{dV}$ est d'autant plus faible que V est plus grand).

Les moteurs à excitation série, possédant une caractéristique naturelle $U = f(I)$ voisine d'une hyperbole, ne modifient pas la situation. Pour éviter tout patinage intense, il faut donc :

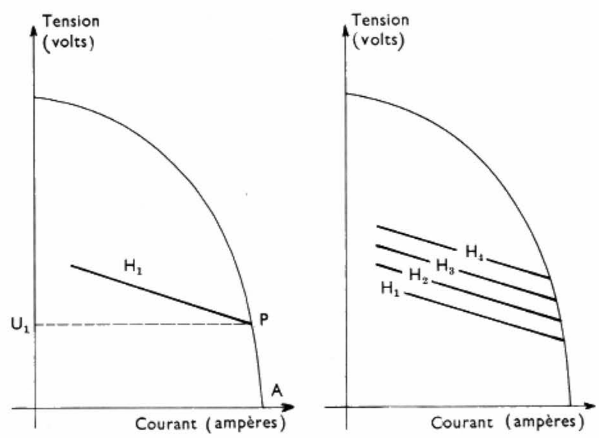
— tout d'abord agencer la transmission de telle sorte que la caractéristique $F = f(V)$ de chacun des moteurs électriques soit aussi verticale que possible. Pour obtenir cette

caractéristique à tension constante, il suffit de coupler en parallèle tous les moteurs de traction : dans cette configuration le patinage de l'un des essieux moteurs modifie très peu les tensions aux bornes et les autres essieux conservent leur couple moteur. De plus l'essieu qui patine n'a pas tendance à s'emballer puisque le moteur qui l'entraîne est alimenté à tension pratiquement constante ;

— lorsque le nombre des moteurs de traction est faible, corriger la forme de la caractéristique $U = f(I)$ du générateur pour la rapprocher d'une forme à tension constante. On peut, par exemple, comme réalisé sur les locomotives 72000 de la S.N.C.F., insérer dans l'excitatrice de l'alternateur un enroulement pilote supplémentaire, enroulement antishunt branché entre un point dont le potentiel U_1 est fixé par la position d'un rhéostat liée à la position du manipulateur de conduite et un point à potentiel U_2, proportionnel au courant débité I (fig. V-56). Un redres-



Dispositif de limitation automatique des patinages (locomotive 72000)



Caractéristiques tension-courant

Fig. V-56

seur *Rd* autorise la circulation d'un courant lorsque U_2 est supérieur à U_1 et l'enroulement antishunt est alors parcouru par un courant démagnétisant qui croît très vite avec la différence des tensions. Ainsi, tant que U_2 est inférieur à U_1, la caractéristique naturelle $U(I)$ de l'alternateur n'est pas modifiée, mais dès que U_2 devient supérieur à U_1 cette caractéristique est remplacée par une caractéristique H_1 à allure horizontale. Dès lors, en cas de patinage, la tension ne croît pas et l'essieu ne s'emballe pas. À chaque position du manipulateur correspond une caractéristique horizontale (H_1, H_2, H_3, etc.), le manipulateur commandant à la fois la vitesse de rotation du diesel, le rhéostat d'hyperadhérence et le shuntage des moteurs de traction. Ces locomotives 72000 fonctionnent donc seulement à puissance limitée. Le même dispositif équipe les nouvelles locomotives 67000.

Ces techniques nouvelles confèrent un avantage incontestable aux transmissions électriques par rapport aux transmissions hydrodynamiques pour lesquelles, en cas de patinage, la seule solution est de couper rapidement l'injection du moteur Diesel et de la rétablir lentement.

5.5. Cas de la turbopropulsion. — Pour des engins circulant à grande vitesse, il paraît séduisant d'abandonner la transmission de puissance par un couple s'appliquant au contact roue-rail et d'adopter la propulsion par hélice.

Mais, indépendamment des sérieux problèmes d'environnement que fait naître cette solution (bruit, souffle d'air entre autres), il importe de bien percevoir que ce déplacement est obtenu par projection d'une quantité de mouvement dans l'air et que tout effort de propulsion, nécessaire pour conférer une accélération importante, implique une importante vitesse relative d'éjection, donc une perte d'énergie notable à chaque démarrage.

L'effort de propulsion est égal à $T = m\ (V - V_0)$, m étant le débit en masse des gaz éjectés à la vitesse V par un véhicule se déplaçant à la vitesse V_0. L'énergie motrice développée est égale à $T . V_0$ soit à $m\ (V - V_0)\ V_0$ ou $m . v . V_0$; $v = V - V_0$ étant la vitesse d'éjection des gaz par rapport à l'espace fixe. Dans cet espace fixe on perd donc une énergie égale à $\frac{1}{2} m\ (V - V_0)^2 = \frac{1}{2} m\, v^2$. Il s'ensuit que le rendement est égal à :

$$\frac{m . v . V_0}{m . v . V_0 + \frac{1}{2} mv^2} = \frac{1}{1 + \frac{v}{2\, V_0}}$$

Il est d'autant plus grand que v est plus petit. Pour avoir un effort propulsif notable, il faut donc avoir recours à un débit en masse d'air important donc à une hélice de grand diamètre.

Exemple : on considère un engin qui, pour rouler à 60 m/s (soit 216 km/h) en solution turbomoteur, requiert une puissance à la jante de 200 kW. Si cet engin est propulsé par une hélice qui projette de l'air à 63 m/s, la puissance requise sur l'arbre du turbopropulseur (en négligeant l'influence des rendements) sera 205 kW mais l'hélice devra posséder un diamètre de 4,5 m. Si l'on réduit ce diamètre à 2 ou à 1 m, les vitesses d'éjection devront être respectivement de 75 et 120 m/s et les puissances requises de 230 et 300 kW.

Le carénage et l'adoption d'une hélice à pales orientables minimisent certes ces sujétions ; elles n'en restent pas moins fondamentales.

6. LES CAISSES

6.1. Caisses d'autorails. — Dès le début, les constructeurs furent astreints à s'orienter vers la recherche de la légèreté, non seulement par suite de l'absence de moteurs puissants mais encore parce qu'on appliquait l'adage bien connu en automobile : « le poids, c'est l'ennemi ». Ils furent donc incités à des réalisations tout à fait nouvelles dans le domaine ferroviaire, surtout à une époque où le souci de la sécurité avait conduit au remplacement de voitures de voyageurs de 34 t, à caisse en bois tôlé, par des voitures entièrement métalliques qui atteignaient jusqu'à 50 t (elles étaient constituées d'un châssis lourd sur lequel reposait une caisse entretoisée par des tôles de 3 à 4 mm d'épaisseur).

Les caisses d'autorails français furent, en général, faites avec des poutres en treillis (fig. V-57) réalisées en acier à haute résistance, systématiquement soudées, poutres gainées ensuite par des tôles d'aluminium de faible épaisseur.

Aux États-Unis d'Amérique, les caisses des trains Zephyr étaient en acier inoxydable 18/8 (d'une résistance de 105 daN/mm²) utilisé en bandes écrouies dont l'épaisseur variait, suivant les pièces, de 0,5 à 1,3 mm et qui pouvaient être soit étirées au banc soit pliées à la machine ; on obtenait ainsi des poutrelles à moment d'inertie très grand pour une masse donnée, assemblées à la soudure par points suivant un procédé qui conservait aux points de soudure la caractéristique d'inoxydabilité. Cette technique fut adoptée, en France notamment, pour la construction de rames automotrices de traction électrique puis pour celle de voitures.

La charpente des caisses d'autorails construits en France après la guerre fut essentiellement constituée par les deux faces en poutres du type *Vierendeel* (c'est-à-dire à montants verticaux sans diagonales) entretoisées par le châssis, le

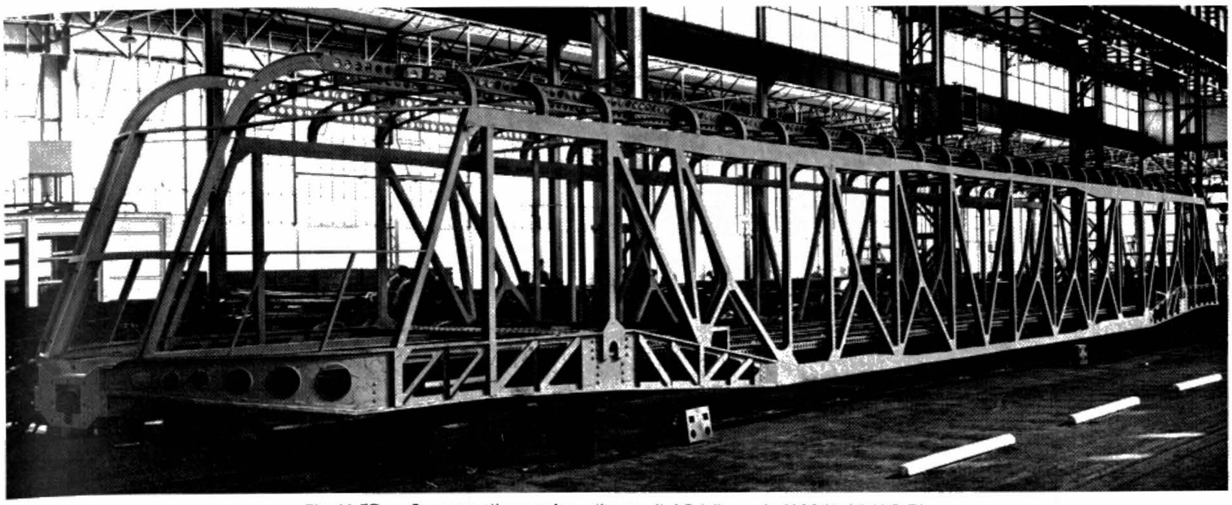


Fig. V-57 — Ossature d'une caisse d'autorail ABJ Renault (1934) (*S.N.C.F.*)

pavillon et les diverses cloisons (fig. V-58). Cette charpente comprend uniquement des tôles pliées ou embouties, sans aucun profilé, et est entièrement assemblée par soudures électriques. Diverses raisons motivent que ces tôles soient en acier ordinaire:

— tout d'abord le fait que tous les aciers, quelle que soit leur nuance, possèdent le même module d'élasticité, donc la même flèche. Celle-ci étant proportionnelle à la puissance quatrième de l'entraxe des bogies, elle revêt une importance prépondérante sur les considérations de fatigue, laquelle est proportionnelle au cube de la travée. Le point important reste d'obtenir un grand moment d'inertie par une répartition judicieuse des éléments de charpente;

— ensuite le fait que les aciers ordinaires se soudent facilement ce qui, dans une certaine mesure, est une garantie de constance de bonne qualité de soudure;

— enfin le prix.

Pour faciliter l'examen des membrures et la lutte contre la corrosion, aucun caisson est entièrement fermé; de nombreux évidements allègent les éléments constitutifs de charpente, éléments dont l'épaisseur des tôles, même pour les brancards et traverses de tête, n'excède pas 3 mm. Malgré leur légèreté, de telles charpentes peuvent résister sans déformations permanentes ni contraintes excessives à un effort de compression de 150 $\times$ 10^2 daN appliqué au droit des organes de tamponnement et à une charge verticale supérieure à 250 daN par mètre carré de plancher. Pour assurer l'interchangeabilité rigoureuse de toutes les fenêtres et faciliter ainsi l'entretien, les parois latérales sont constitutuées d'éléments emboutis réalisant chacun, d'une seule pièce, l'encadrement d'une fenêtre et la moitié de deux montants voisins. Avant garnissage, l'intérieur de la charpente est peint en aluminium pour favoriser l'isolation thermique par diminution du rayonnement; le revêtement des faces et du plafond est en contreplaqué ignifugé; le plancher est isolé par platelages en ébonite mousse avec tapis en matière plastique.

6.2. Les caisses de locomotives. — Les deux formules, monocabine à capots et bicabine à caisse proprement dite, conservent leurs partisans et leurs adversaires, chacune d'elles présentant des avantages et des inconvénients spécifiques, les questions d'esthétique étant laissées de côté.

6.2.1. Monocabine à capots (type locomotive 66000). — Avec ses capots amovibles et ses platelages latéraux, cette disposition est très appréciée tant lors de l'entretien quotidien que lors des grandes visites et des révisions.



Fig. V-58

Charpente de caisse type Vierendeel (*S.N.C.F.*)

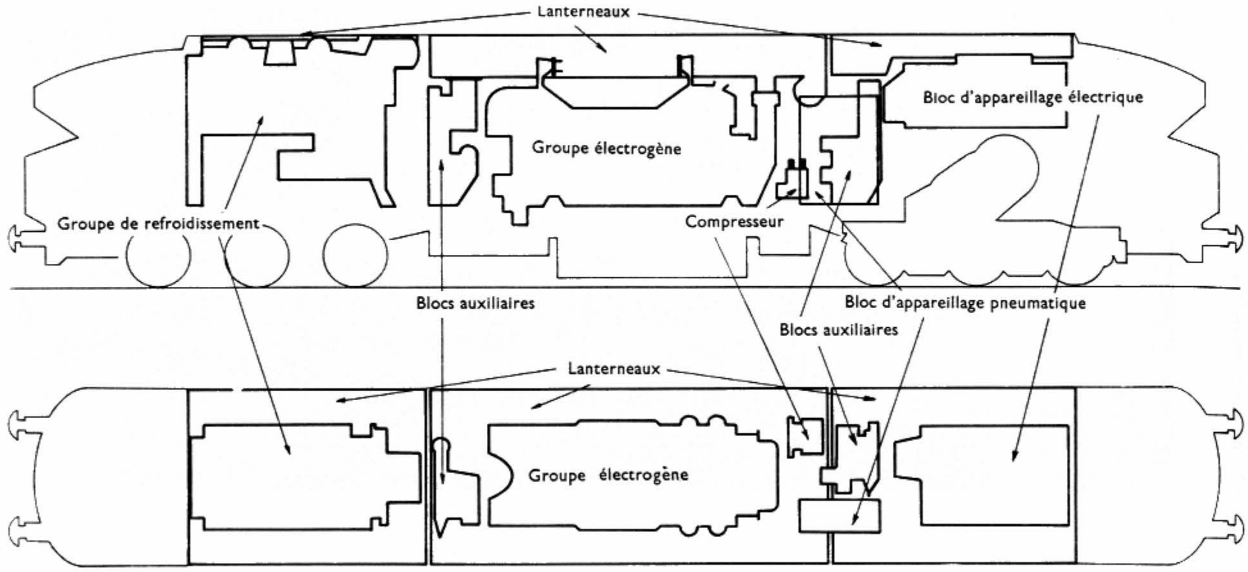


Fig. V-59 — Sous-ensembles d'une locomotive 72000

Le châssis en est très simple puisqu'il peut consister en deux longerons soudés aux traverses d'extrémités, aux traverses pivots et aux traverses intermédiaires, le tout pouvant avantageusement être recouvert d'une tôle plane dans laquelle sont ménagées les ouvertures utiles aux passages des câbles électriques et des tuyauteries.

Du fait de la position du poste de conduite, le conducteur est protégé en cas de collision.

L'inconvénient des locomotives à capots réside dans la mauvaise visibilité, génératrice de gêne, voire de danger, dans les voies sinueuses pouvant être fréquentées par des hommes ou des animaux.

6.2.2. Bicabine à caisse (type locomotive 67000). — Cette disposition peut conduire à un ensemble plus léger car l'enveloppe de la charpente peut concourir à la résistance et à la rigidité de l'ensemble.

Ainsi le châssis de caisse peut être constitué par deux brancards en tôle pliée de 10 mm d'épaisseur, réunis par des traverses de tête, les traverses pivots de bogie (sauf dans le cas de locomotives à bogies monomoteurs) et des traverses intermédiaires — supports du groupe électrogène. Sur les brancards sont soudées les faces latérales constituées chacune par une poutrelle en treillis en N, en tôle pliée de 6 mm, recouverte d'une tôle d'acier de 1,5 mm rapportée par soudure.

Les cabines de conduite possèdent une ossature en acier fortement charpentée formant bouclier anticollision ; la surface extérieure est une enveloppe moulée en complexe résine polyester-fibre de verre renforcée dans les arrondis par des panneaux sandwichs de mousse de polyuréthanne.

Afin de faciliter les opérations d'entretien, moins aisées à réaliser dans une coursive que sur un platelage, les appareils peuvent avantageusement être groupés en sous-ensembles rigoureusement interchangeables ainsi que les lanterneaux (fig. V-59).

7. BOGIES D'AUTORAILS ET DE LOCOMOTIVES DIESEL

Les bogies d'autorails méritent une mention particulière car ils ont été conçus en marge des bogies traditionnels du matériel moteur ou remorqué, du fait du service difficile que devaient assurer ces engins isolés, circulant à grande vitesse sur des lignes plus ou moins bien armées.

La doctrine, adoptée à l'orée de la guerre de 1939-1945, et mise en application dès la Libération, est assise sur les bases suivantes :

— Légèreté, le poids étant l'ennemi de l'économie et de la performance et les efforts dynamiques supportés par les structures étant proportionnels aux masses. On supprima donc les lourdes traverses danseuses, on élabora les longerons et traverses sous des structures en caissons et non plus en I, on adopta la roue monobloc.

— Absence de jeux, donc de tout guidage par frottement, l'entraînement caisse-bogie étant assuré soit par anneaux à tourillons et biellettes à silentblocs, soit par câbles.

— Absence de frottements qui constituent une résistance dont on n'est pas maître ; on élimina donc la rotation de bogie par frottement de lissoirs sur des appuis plus ou moins bien graissés ; on remplaça les ressorts à lames par des ressorts en hélice et les amortisseurs à friction par des amortisseurs hydrauliques.

— Flexibilité : la période de l'oscillation verticale fut accrue et on introduisit une flexibilité de roulis afin de limiter les chocs sur la voie.

— Facilités d'entretien : l'adoption de boîtes d'essieu intérieures facilita la visite des roues, par ailleurs montées sur portées coniques, et l'échange des semelles de frein.

Le bogie des éléments automoteurs 330 kW syncrétise ces novations fondamentales et technologiques (fig. V-60). Le châssis est composé de deux longerons (constitués par 2 U assemblés par soudure et renforcés par des nervures dans les sections transversalement les plus sollicitées) et deux traverses centrales (également en caisson) dont les extrémités reçoivent les biellettes de suspension de la caisse ; deux traverses en tube complètent l'ossature dont la masse n'est que de 1 140 kg alors que les essieux sont chargés jusqu'à 18 t. Le pivot central ne supporte aucune charge verticale ; son unique rôle est l'entraînement de la caisse. Il est relié aux traverses centrales par deux bielles garnies de silentblocs qui, disposés horizontalement, permettent les déplacements verticaux de la caisse. Ce dispositif d'entraînement, placé au niveau des essieux, n'excite pas de vibrations verticales de caisse qui pourraient, sans cela, naître sous l'effet des oscillations de galop du châssis de bogie.

Une suspension pendulaire originale assure les suspensions verticale et transversale de caisse ainsi que la rotation du bogie. Elle est constituée esentiellement par deux gros ressorts en hélice qui, supportant tout le poids de la caisse, reposent chacun au centre d'un balancier suspendu au châssis de bogie par des biellettes à articulation torique ; des guides, situés au centre de ces ressorts, maintiennent ces derniers perpendiculaires au châssis de caisse et associent les balanciers à tous les mouvements de la caisse dans le plan horizontal, transmettant ainsi les efforts de rappel latéral et les efforts de rotation du bogie. Ces guides forment, par surcroît, amortisseurs des oscillations verticales, les transversales étant réduites par des amortisseurs à double effet.

La liaison châssis de bogie-essieu est assurée, pour chaque boîte, par deux lames en acier disposées l'une au-

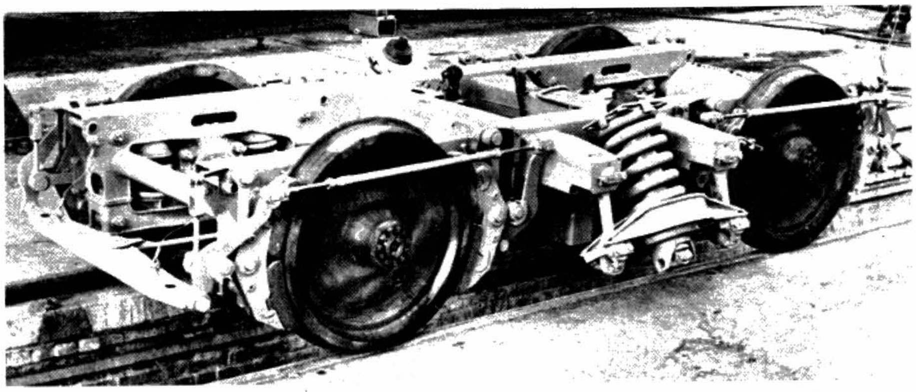


Fig. V-60

Bogie d'élément automoteur 330 kW (*S.N.C.F.*)

dessus l'autre, au-dessous de la boîte d'essieu à laquelle elles sont liées en leur milieu ; leurs extrémités, garnies de bagues en caoutchouc, sont liées au châssis par des axes. La suspension primaire est assurée exclusivement par des ressorts en hélice disposés de part et d'autre de chaque boîte d'essieu.

Les boîtes d'essieu sont équipées de roulements à rotule, permettant la circulation sur une voie gauche.

Concurremment, les spécialistes S.N.C.F. du bogie autorail, remplacèrent dans des bogies destinés à des locomotives diesels, les bielles pendulaires de rappel transversal des bogies conventionnels par des sandwichs en caoutchouc offrant les mêmes caractéristiques de flexibilité et d'amortissement, supprimant les appuis frottants, moins coûteux qu'eux et allégeant les opérations d'entretien.

Une seconde novation, au moins aussi profonde que la première, fut amorcée dès 1965. C'est ainsi que des bogies porteurs (type 207) prototypes ont été placés en service expérimental prolongé en 1967. Dans ce bogie, les masses non suspendues, qu'elles soient verticales ou transversales, ne sont plus que les essieux avec leurs boîtes et un petit châssis d'entretoisement de celles-ci (fig. V-61). La suspension verticale est assurée par 4 barres de torsion (comprenant 4 blocs de caoutchouc) dont les leviers sont conjugués de façon telle qu'ils fixent la flexibilité de roulis. La liaison caisse-bogie est réalisée au moyen de câbles disposés dans le plan des essieux. Des bogies de conception similaire (type 214) équipent l'engin expérimental à turbine à gaz qui a parcouru de grandes distances à des vitesses supérieures à 230 km/h, et dont, en toutes circonstances, le confort fut très apprécié. Les boîtes d'essieu sont liées directement aux extrémités de leviers amplificateurs des barres de torsion avec interposition de sandwichs caoutchouc et non plus, comme dans le type 207 par des bielles de suspension en forme de C. La suspension transversale est assurée par des Spheriflex, qui sont chacun une sphère (ou un cylindre) reliée par du caoutchouc à deux parallèles situées de part et d'autre (fig. V-62).

Dans le domaine des bogies moteurs de locomotives Diesel, il faut mentionner deux réalisations françaises originales. L'étude du bogie de la locomotive S.N.C.F. A1A-A1A 68000, menée par le bureau d'études de C.A.F.L., fut dominée par le souci d'utiliser au mieux le poids adhérent des deux essieux moteurs. Elle a conduit à adopter deux dispositifs spéciaux :

— l'un s'oppose au délestage de l'essieu avant de chaque bogie sous l'influence de l'effort de traction ;

— l'autre compense le délestage des essieux du bogie avant sous l'influence du cabrage de caisse.

Le premier permet, à l'aide d'un pivot de traction, d'atteler la caisse au bogie de telle sorte que tout effet de délestage d'un essieu moteur provoque un couple antagoniste proportionnel à l'effort de traction. Celui-ci, en s'exerçant sur le châssis de bogie, s'oppose au déchargement de cet essieu (fig. V-63). Pour ce faire, le pivot émerge du châssis de bogie et par son extrémité supérieure prend appui dans le logement d'une traverse de charge liée au châssis de caisse. Le pied de ce pivot est relié au socle de traction par deux groupes de biellettes jumelles, formant entre eux un angle dont le sommet est situé sensiblement

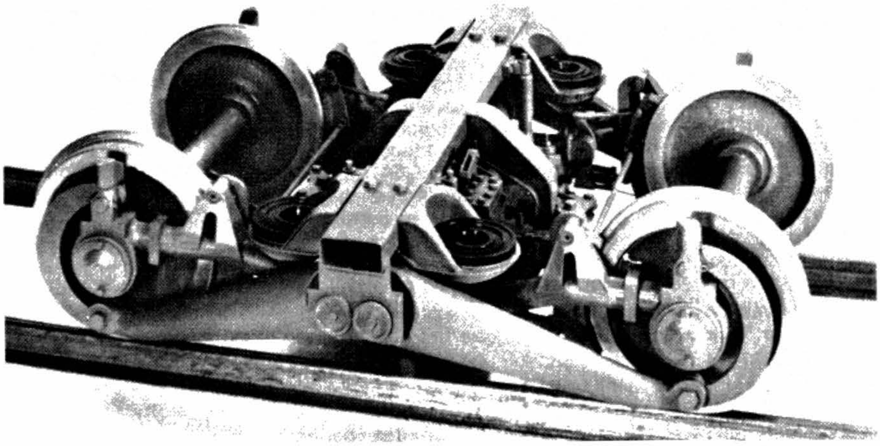


Fig. V-61

Bogie type 207 (*S.N.C.F.*)

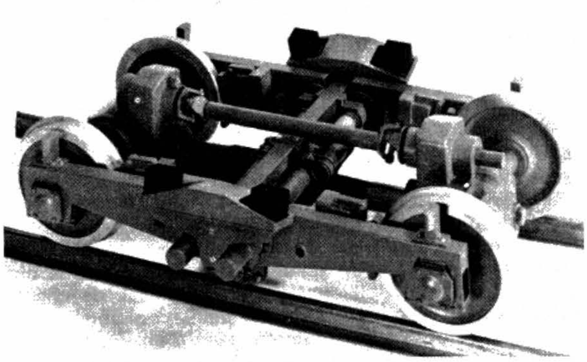


Fig. V-62 — Bogie type 214 (*S.N.C.F.*)

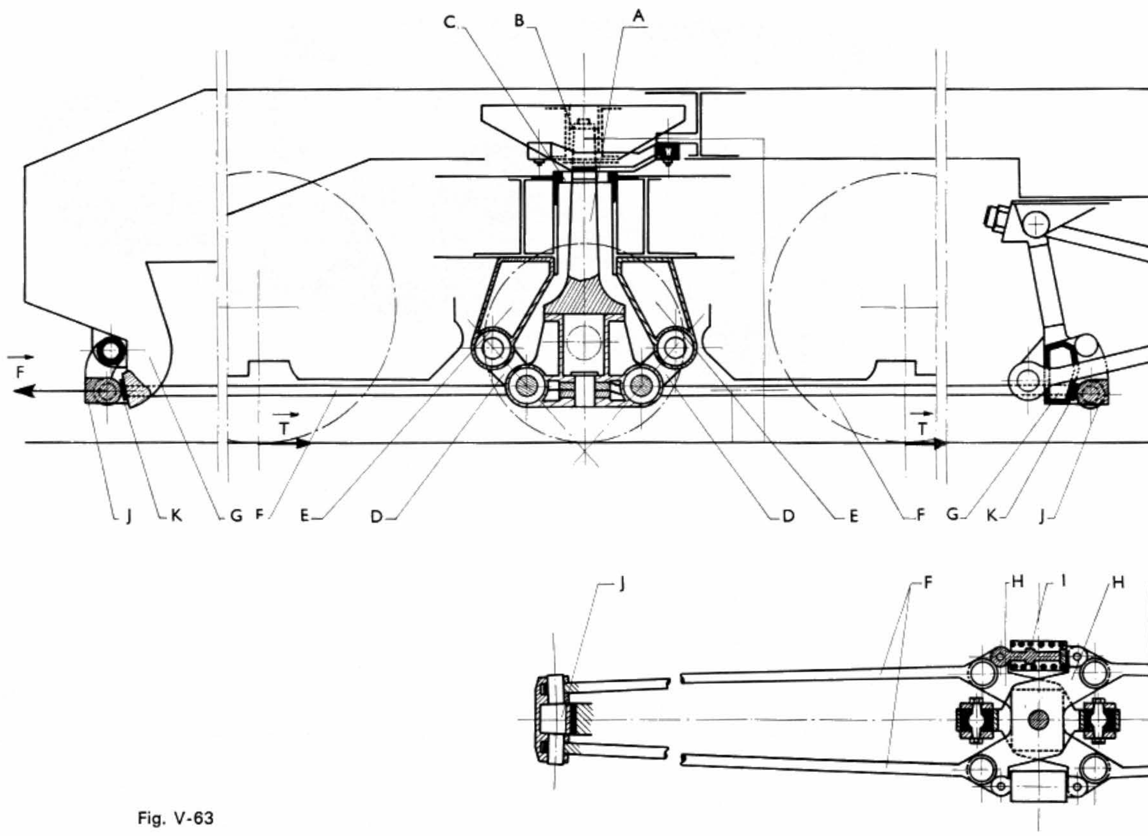


Fig. V-63

au niveau du rail. Ce dispositif n'étant sollicité que par les efforts de traction, à l'exclusion de toute force résultant des charges verticales, le couple de cabrage $F.l$ susceptible de délester l'essieu avant est contrebalancé par le couple antagoniste $f.L$ exercé par le pivot de traction sur le châssis de bogie : tout se passe donc comme si l'effort F était transmis au niveau du rail.

Le second dispositif compense la perte globale d'adhérence résultant du déchargement du bogie avant par rapport à l'autre en augmentant momentanément, au début du démarrage, la charge sur les essieux moteurs du bogie avant au détriment de l'essieu porteur (fig. V-64). En envoyant de l'air à la partie inférieure de 4 cylindres installés au-dessus et dans l'axe des ressorts de l'essieu porteur on annule l'action du ressort intérieur. En réalité, ce dernier dispositif, s'étant avéré superflu, dans l'état actuel de l'exploitation de ces locomotives, il n'est pas utilisé.

L'autre réalisation originale intéresse les bogies de la locomotive BB BB en service en Afrique noire.

La tendance à l'accroissement des charges remorquées est particulièrement vive dans les réseaux africains où les trains miniers prennent chaque jour plus d'importance. L'augmentation des puissances Diesel offertes permet d'assurer ces trafics dans de meilleures conditions sous réserve de l'accroissement du poids adhérent des locomotives ; or les voies à écartement métrique de ces réseaux admettent difficilement des charges par essieu élevées et les bogies C classiques s'inscrivent en courbe moins bien que les bogies B. Ces considérations motivèrent l'étude et la réalisation de la locomotive Diesel C.E.M.-C.A.F.L. de 2 500 kW à 4 bogies B. Ces bogies ont été disposés de telle manière que l'inscription en courbes de 50 m restât facile malgré la longueur hors tout de 19 m et que les 130 t (en ordre de marche) soient réparties d'une manière homogène sur la voie quel que soit l'état de cette dernière. Les bogies sont groupés par deux en duplex : chaque bogie élémentaire ne possède qu'un seul moteur, placé le plus bas possible, et reçoit dans l'axe transversal, de chaque côté, l'appui d'un des deux brancards du sommier de liaison entre bogies par l'intermédiaire d'un double sandwich de caoutchouc jouant le rôle de pivoterie. Un système articulé transversal prenant appui sur les brancards de liaison latérale entre les bogies, possède des bielles extérieures recevant les appuis de châssis de caisse, appuis qui s'exercent au niveau des boîtes d'essieu, donc en position très favorable à l'égard de la tenue de voie. L'ensemble extrêmement compact offre, néanmoins, un accès très ouvert aux moteurs de traction et aux organes de frein, permettant ainsi un entretien aisé. La masse unitaire d'un duplex, moteurs de traction exclus, est seulement de 20,5 t ; la charge maximale par essieu est de 16,2 t avec un empattement élémentaire de 1,6 m. Les locomotives ainsi équipées remorquent 1 200 t en rampes de 20 ‰ avec courbes et contrecourbes à faible rayon ; leur vitesse maximale est de 80 km/h. Ces couplages de bogies apportent donc une solution simple et élégante aux problèmes de traction, de circulation et d'économie.

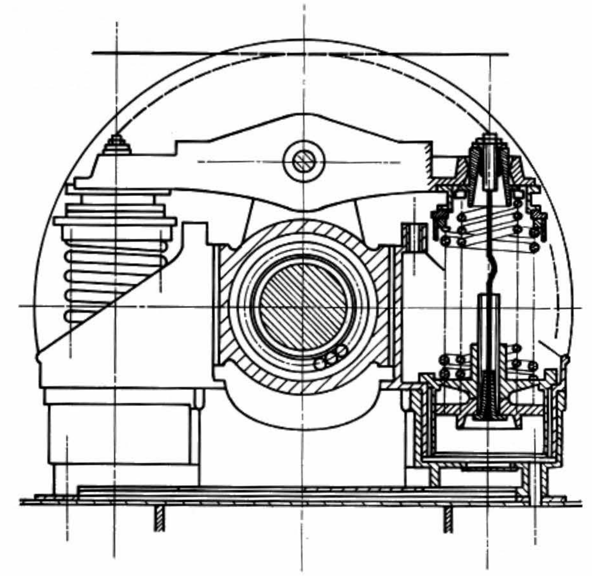


Fig. V-64 — Schéma du dispositif de déchargement de l'essieu porteur d'une locomotive 68000

CHAPITRE VI

MATÉRIEL REMORQUÉ

On appelle matériel remorqué l'ensemble du matériel ferroviaire affecté au transport des personnes, des animaux ou des marchandises. On distingue :

— *Le matériel remorqué proprement dit*, spécialement aménagé pour rouler sur les voies ; il est tracté ou poussé par des engins moteurs et comprend deux sortes de véhicules :

• *Les voitures qui assurent le transport des voyageurs*, certains services annexes à ce transport, les fourgons à bagages, les véhicules pour le transport des automobiles accompagnées.

• *Les wagons qui sont utilisés pour le transport des marchandises*, des engins routiers et éventuellement des animaux vivants.

— *Le matériel non roulant sur rails :* les conteneurs et les transconteneurs, emballages réutilisables destinés au transport des marchandises, et les engins routiers, équipés spécialement pour être transportés, généralement à grande distance, sur des wagons-porteurs aménagés pour les recevoir.

MATÉRIELS POUR LE TRANSPORT DES VOYAGEURS

1. CLASSIFICATION

Les voitures peuvent être classées de la façon suivante :

— *voitures de banlieue* conçues pour assurer le transport d'un grand nombre de personnes à des fréquences de circulation et d'arrêts élevées sur de courtes distances ;

— *voitures d'express* de service intérieur de jour ou de fin de soirée pour des relations de moyenne distance ne dépassant pas 500 km ;

— *voitures de service international* assurant les relations de jour et de nuit sur les grandes artères. Dans cette catégorie sont inclus plusieurs types de véhicules allant des voitures d'express ordinaires, ayant un confort moyen et circulant à des vitesses maximales voisines de 150 km/h, aux voitures de grand confort et de prestige bénéficiant d'aménagements et d'installations très poussées ; ce dernier type de matériel est également utilisé pour les trains rapides dont la vitesse atteint 200 km/h sur certaines grandes lignes de la S.N.C.F.

— *voitures spéciales* telles que :
voitures-couchettes,
voitures-lits,
voitures-restaurant,
voitures sanitaires,
voitures postales,
fourgons de transport d'automobiles.

Toutes ces voitures bénéficiens d'aménagements différents, appropriés à l'usage imposé par la clientèle.

2. TECHNIQUE DE CONSTRUCTION

La structure d'une voiture de chemin de fer doit satisfaire à des conditions de résistance bien déterminées qui ont été définies à l'échelon européen par une commission spécialisée, cela dans le cadre de l'U.I.C.

2.1. Caractéristiques des efforts. — Les caisses sont soumises à des efforts statiques de compression, exprimés en méganewtons (MN), dans les conditions suivantes :

2 MN minimum au niveau des tampons ;
0,5 MN minimum en diagonale au niveau des tampons ;
0,4 MN minimum à 350 mm au-dessus de l'axe des tampons ;
0,3 MN minimum à la ceinture de caisse ;
0,3 MN minimum au niveau du battant du pavillon.

Pour les efforts statiques localisés applicables en vue de l'attelage automatique, les valeurs suivantes ont été retenues : 2 MN en compression et 1,5 MN en traction.

Par ailleurs, l'ensemble châssis-caisse doit satisfaire à une charge verticale uniformément répartie donnée par la formule :

$$P = K\,(P_1 + P_2)$$

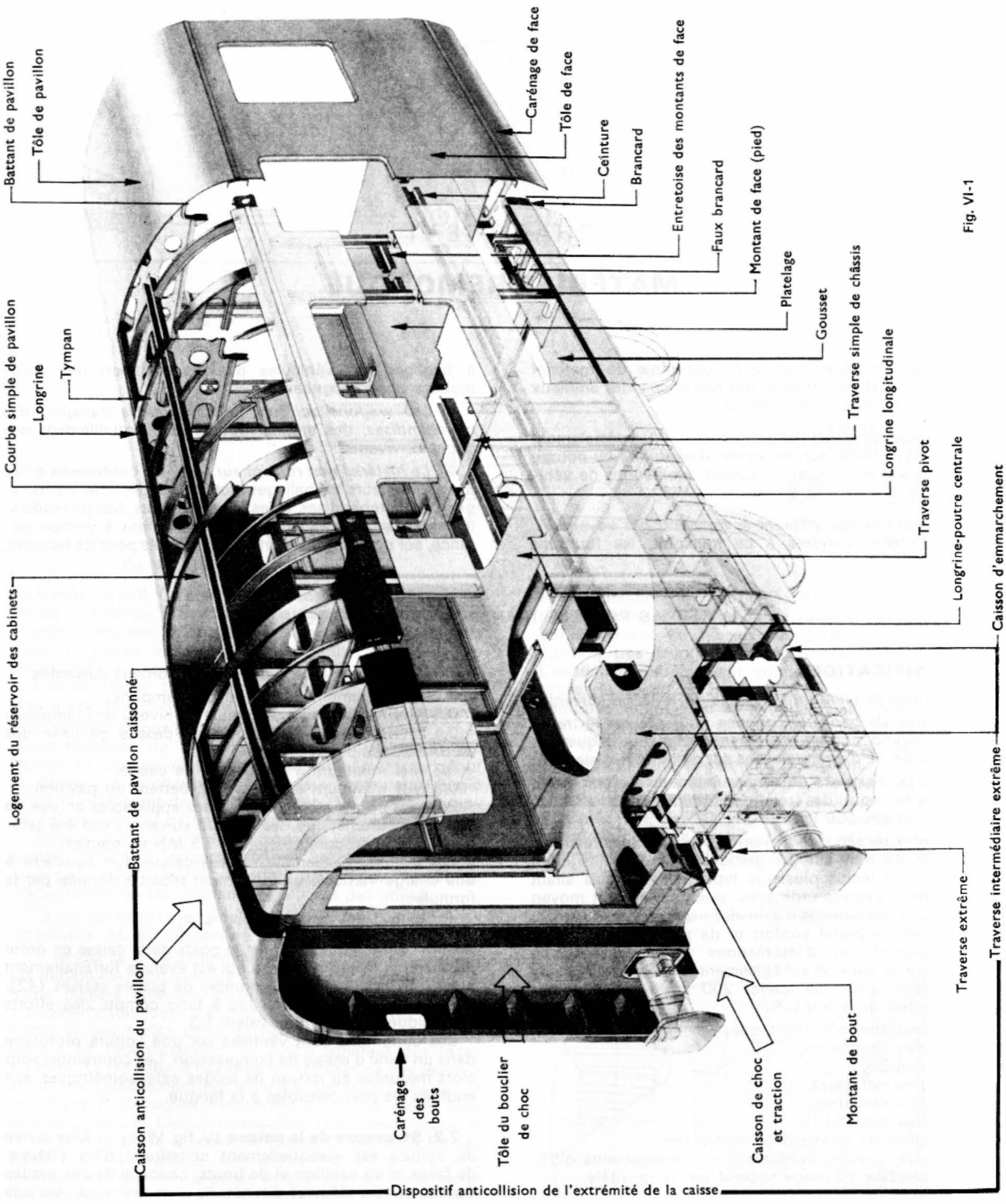
relation dans laquelle P_1 est le poids de la caisse en ordre de marche, P_2 est la charge qui est évaluée forfaitairement à 80 daN multiplié par le nombre de places assises (42), K étant un coefficient destiné à tenir compte des efforts dynamiques et qui a pour valeur 1,3.

Ces conditions sont vérifiées sur une voiture prototype dans un banc d'essais de compression. Les contraintes sont alors mesurées au moyen de jauges extensométriques aux endroits les plus sensibles à la fatigue.

2.2. Structure de la caisse (V. fig. VI-1). — Une caisse de voiture est essentiellement constituée d'un châssis, de faces, d'un pavillon et de bouts, chacune de ces parties constituant un élément distinct. Ils sont assemblés les uns aux autres suivant des techniques de construction pour former un tube indéformable résistant aux efforts spécifiés ci-dessus (V. § 2.1).

Des considérations de poids sur rails entrent en ligne de compte pour déterminer les techniques d'assemblage. Celles-ci sont différentes suivant qu'il s'agit de construction en acier inoxydable ou en acier ordinaire, par exemple.

1° *Le châssis.* — Il est constitué essentiellement de brancards longitudinaux assemblés aux extrémités aux



Battant de pavillon
Tôle de pavillon
Courbe simple de pavillon
Longrine
Tympan
Logement du réservoir des cabinets
Battant de pavillon caissonné
Caisson anticollision du pavillon
Carénage des bouts
Tôle du bouclier de choc
Dispositif anticollision de l'extrémité de la caisse
Caisson de choc et traction
Montant de bout
Traverse extrême
Traverse intermédiaire extrême
Caisson d'emmarchement
Longrine-poutre centrale
Traverse pivot
Longrine longitudinale
Traverse simple de châssis
Gousset
Platelage
Montant de face (pied)
Faux brancard
Entretoise des montants de face
Brancard
Ceinture
Tôle de face
Carénage de face

Fig. VI-1

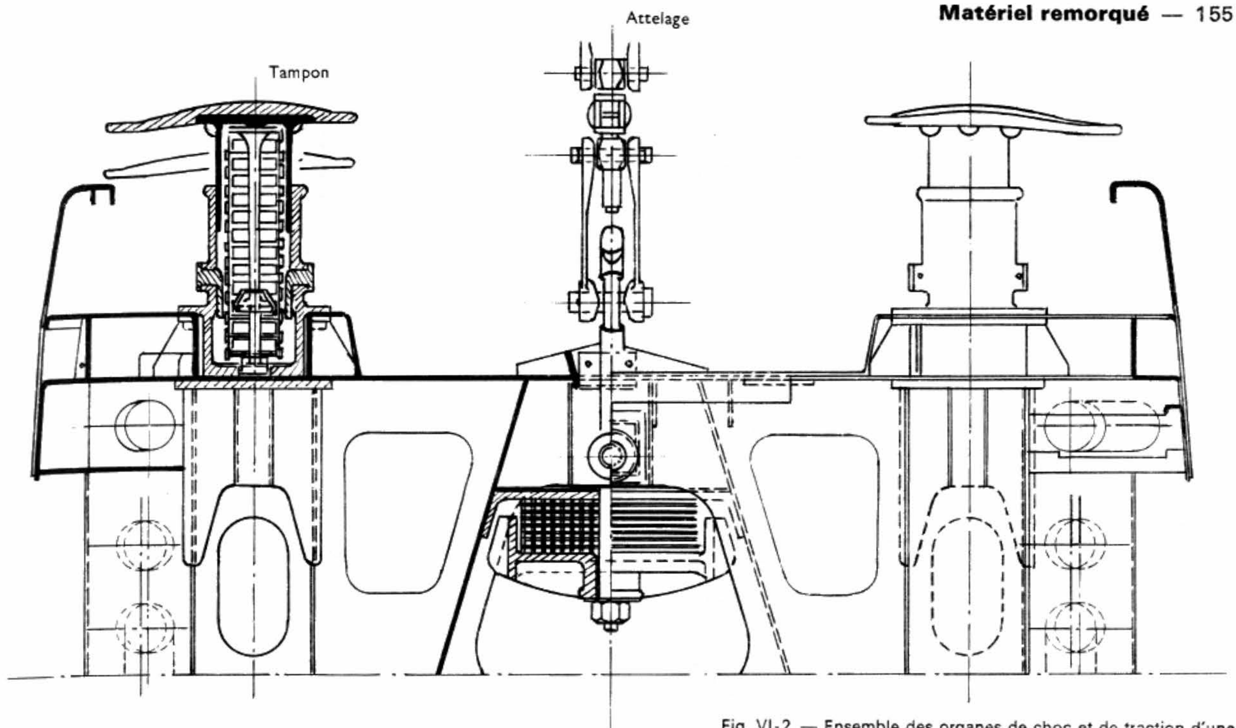


Fig. VI-2 — Ensemble des organes de choc et de traction d'une voiture moderne, avec tampons Ringfeder et ressort de traction en caoutchouc (*S.N.C.F.*)

caissons de choc et traction dont la constitution a été déterminée pour recevoir le tamponnement courant et, dans le futur, l'attelage automatique. Chaque caisson de choc et traction comprend une traverse de tête qui reçoit les tampons. Les efforts de compression sur les brancards latéraux et la traverse pivot sont transmis par l'intermédiaire de poussards.

Des longrines longitudinales et transversales relient les brancards entre les deux traverses pivot du châssis. Un platelage soudé sur toute la longueur du châssis assure à l'ensemble ainsi constitué une rigidité convenable.

2° *Les faces.* — Les faces sont constituées par des montants verticaux placés entre les ouvertures de baies (trumeaux). Ils sont assemblés le plus souvent par soudure au platelage de châssis à l'aide de goussets destinés à assurer une rigidité transversale convenable. À la partie supérieure, ils sont soudés au battant du pavillon constitué par un profilé de grande section s'étendant sur toute la longueur de la voiture. Ils sont reliés les uns aux autres par des profilés qui constituent les encadrements de baie. L'ensemble ainsi constitué est revêtu d'une tôle de 2,5 mm d'épaisseur.

3° *Le pavillon.* — Il se présente sous la forme d'une armature en profilés comprenant en général trois longrines longitudinales prenant appui sur les bouts de la caisse et un certain nombre de courbes transversales en tôle pliée sur lesquelles est soudée une tôle verticale pour constituer les tympans. Ceux-ci relient transversalement les battants du pavillon. Deux courbes intermédiaires, entre chaque tympan, complètent l'ossature du pavillon. Des profilés de section appropriée relient les uns aux autres, longitudinalement, les courbes et les tympans. Une tôle de pavillon vient coiffer cet ensemble jusqu'au niveau des battants de pavillon.

4° *Les bouts.* — Ils ont été étudiés dans le but de former un bouclier anticollision en cas d'accident. La paroi de bout est constituée par des montants verticaux dont les extérieurs sont communs aux faces, les intérieurs servent d'encadrement à la porte d'intercirculation. Ils sont recouverts d'une tôle de forte épaisseur (4 mm) qui confère à l'ensemble un moment d'inertie important.

L'assemblage des quatre éléments constituant la caisse est réalisé de façon à lui donner une résistance aussi voisine que possible de celle du tube. À cet effet, les liaisons sont réalisées par soudure sur des parties venant en recouvrement sur la plus grande longueur possible de chacun des éléments.

5° *Choc et traction* (fig. VI-2). — Les organes de choc et de traction constituent un ensemble fonctionnel dont le rôle est de permettre l'attelage des véhicules entre eux et la transmission de l'effort de traction de la locomotive.

Les organes de traction comprennent (V. fig. VI-3) :

— Un crochet placé dans l'axe de la traverse de tête à chaque extrémité du véhicule. Il est muni d'un œil relié à un ressort qui travaille en compression.

— Une manille qui s'accroche dans le crochet du véhicule contigu.

— Deux bielles de traction reliées au crochet avec lequel elles sont assemblées par un axe.

— Deux écrous fixes à pas contraires (l'un est fixé à l'autre extrémité des bielles de traction, l'autre sur la manille).

— Une vis avec un bras destiné au serrage de l'attelage.

Les organes de choc comprennent deux tampons placés en bout du véhicule, aux extrémités de la traverse de tête. Ils sont destinés à donner à l'attelage l'élasticité nécessaire pour la circulation dans les courbes et à absorber les réactions entre véhicules provoquées par le freinage et les effets dus à l'inertie au moment des manœuvres en service.

Ils sont constitués par les organes suivants :

- un plateau de contact ;
- un boisseau ;
- un ressort travaillant en compression qui est le plus souvent réalisé en éléments caoutchouc absorbant.

L'écartement des tampons est unifié à la cote de 1,750 m sur tout le matériel répondant aux règles de l'U.I.C. circulant en Europe. L'axe de tamponnement ne doit pas dépasser 1,065 m au-dessus du niveau des rails. Dans certains pays (États-Unis d'Amérique et U.R.S.S., par exemple), une grande partie du matériel remorqué est équipé d'un attelage automatique capable d'assumer les efforts de traction et de chocs ainsi que les couplages pneumatiques et électriques. Un attelage de ce genre a été étudié à l'échelon européen dans le cadre de l'Office de recherche et d'essais (O.R.E.).

Le châssis des véhicules de construction récente a été conçu pour le recevoir ultérieurement sans modification (V. chap. 7).

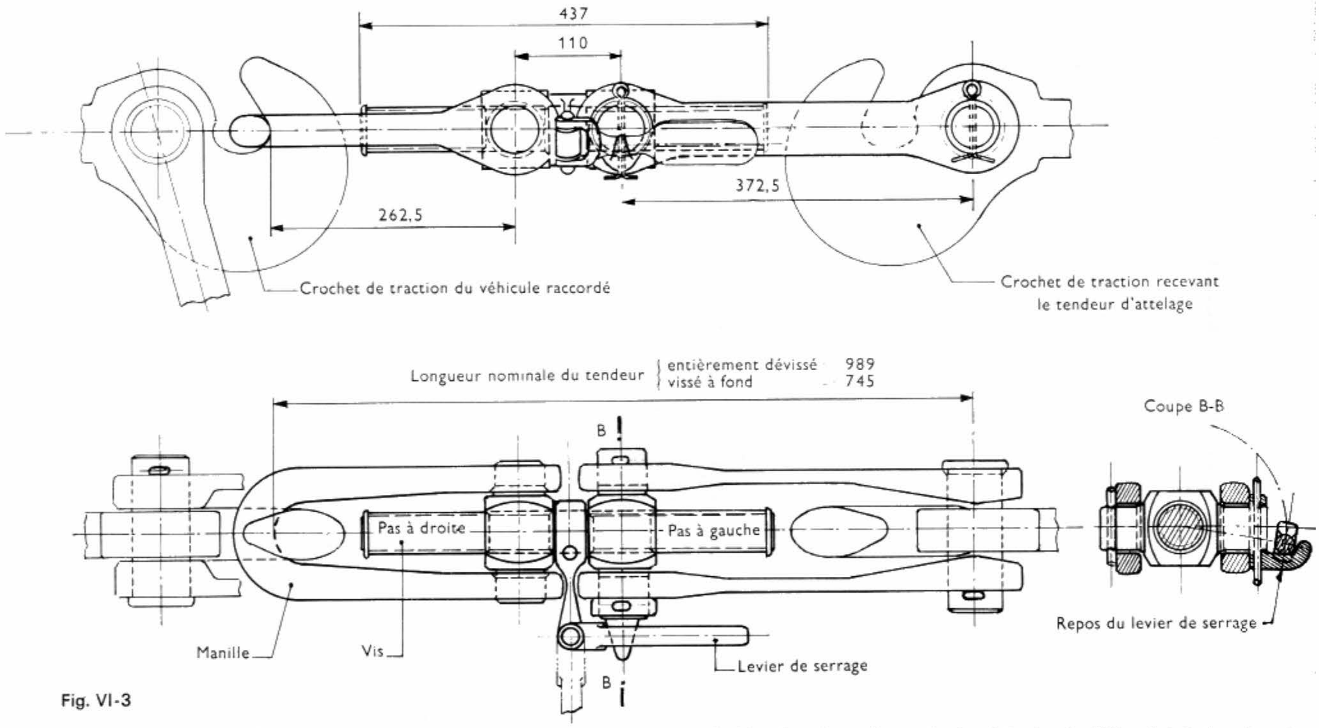


Fig. VI-3

2.3. Calcul d'une caisse de voiture

2.3.1. Généralités. — Une méthode de calcul a été élaborée par l'Office de recherche et d'essais (O.R.E.) de l'U.I.C. en corrélation avec des mesures extensométriques des contraintes. Les experts de l'Office de recherche et d'essais ont porté leur choix sur la méthode de la théorie générale des systèmes hyperstatiques développée avec l'aide d'un calculateur électronique dont la capacité de mémoire permet de calculer des caisses comportant dix-sept ouvertures de baies et de portes.

Cette méthode de calcul assimile la caisse à une poutre Vierendeel constituée de *n* cadres mis bout à bout comportant chacun une ouverture (celles des baies et aux extrémités les portes d'accès). Les trois grandeurs hyperstatiques, (moment de flexion, effort normal et effort de cisaillement) sont introduites dans les sections et définies à l'aide des équations de la théorie de l'élasticité. Le degré hyperstatique d'une caisse de voiture assimilée à une poutre est de 3 *n*. Une voiture *B* 11 type U.I.C. comportant 11 ouvertures de baies et 2 ouvertures aux extrémités, soit 13 au total, conduira donc à un système de 3 × 13, soit 39 équations contenant bien entendu 39 inconnues. Il est facile de se rendre compte que sans l'aide du calculateur électronique, ces travaux seraient difficiles, longs et fastidieux.

C'est à l'Institut de statique aéronautique et de constructions légères de l'École polytechnique de Zurich que cette méthode a été élaborée et mise au point. Les essais statiques des caisses de voitures (fig. VI-4) ont été effectués à la station d'essais de Vitry-sur-Seine (S.N.C.F.). Deux cas de charge ont été retenus :

— charge verticale (poids de la caisse augmenté de la charge multipliée par un coefficient 1,3) ;

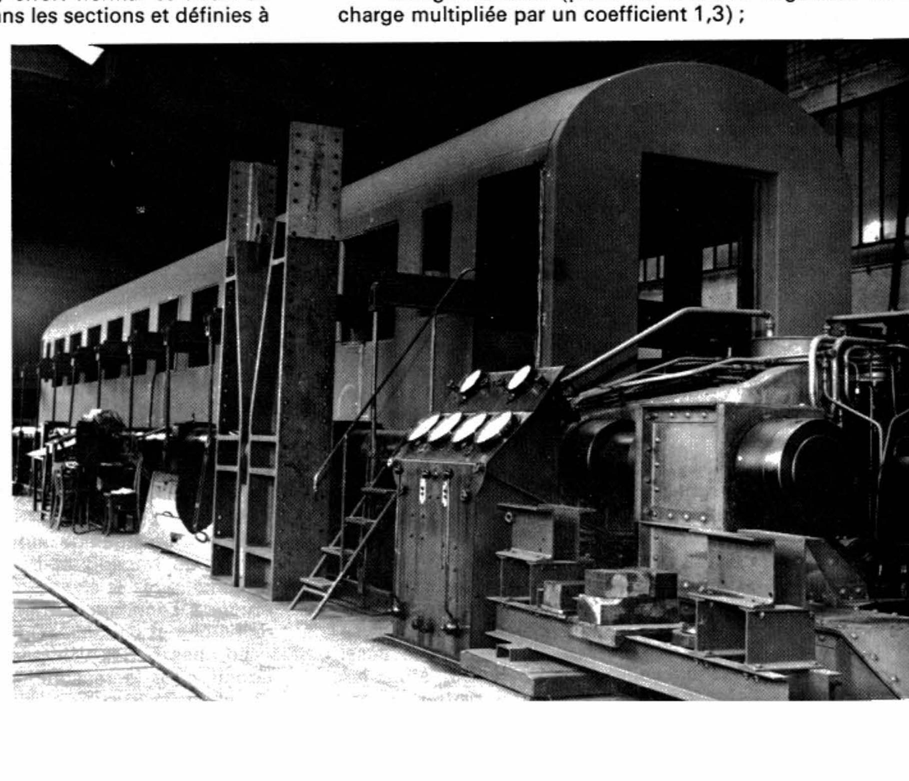


Fig. VI-4

Essais statiques des caisses de voitures :
— à droite, dispositif permettant d'appliquer l'effort longitudinal ;
— dans les ouvertures, poutrelles permettant d'appliquer la charge verticale (*S.N.C.F.*)

— effort longitudinal de compression appliqué sur les tampons.

1° *Charge verticale.* — La caisse est traitée comme une poutre simple reposant sur deux points d'appui constitués par les pivots. La charge est supposée uniformément répartie sur toute la longueur de la poutre (fig. VI-5).

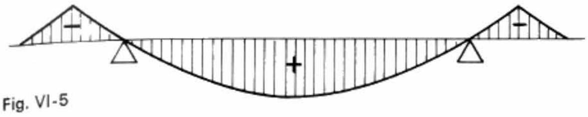


Fig. VI-5

Les moments sont positifs en dessous de la poutre dans la partie située entre les pivots. Ils sont négatifs sur les porte-à-faux.

Il y a lieu de considérer que les efforts de cisaillement sont importants et qu'il est indispensable d'en tenir compte en les composant aux efforts de torsion et de flexion, en particulier dans la section des trumeaux où les contraintes qu'ils provoquent peuvent atteindre 50 % de la valeur totale des contraintes mesurées.

Comme on peut le constater sur la figure VI-6, les efforts de cisaillement sont maximaux aux points d'appui et s'annulent au milieu de l'entraxe des pivots.



Fig. VI-6

2° *Effort longitudinal de compression.* — Comme il a été indiqué précédemment, les caisses doivent supporter un effort de compression statique de 2 MN transmis par les tampons. C'est cette valeur seule qui est prise en considération dans la méthode de calcul de l'O.R.E. Il convient de remarquer que l'essai de compression statique ne reproduit pas les efforts dynamiques obtenus en service. Il est encore assez difficile à l'heure actuelle de cerner les phénomènes dynamiques en compression. On considère toutefois que l'effort de 2 MN en bout donne toute garantie de sécurité au point de vue résistance.

Les contraintes les plus importantes sur les faces sont constatées aux angles de baie.

2.3.2. Exécution pratique des calculs. — Les dimensions générales étant connues (longueur, largeur, distance entre pivots), il est nécessaire de procéder aux calculs des éléments de cadre de la poutre par les procédés habituels de résistance des matériaux en partant des éléments ci-après :

— surface de la section pour le calcul des déformations ;

— moment d'inertie pour le calcul de la déformation et de la fatigue due au moment de la flexion ;

— position du centre de gravité ;

— superficie de l'aire pour la détermination de la valeur des déformations dues aux efforts de cisaillement.

On détermine ensuite la position des axes neutres qui servent de ligne de référence.

Pour chaque champ (rectangle formé par les axes neutres des membrures supérieure et inférieure et les axes neutres des deux trumeaux adjacents ; fig. VI-7 a et b) il est nécessaire de préciser les valeurs suivantes : la largeur du champ, la hauteur libre de l'ouverture, les distances entre les bords des membrures et les axes neutres, les distances entre les

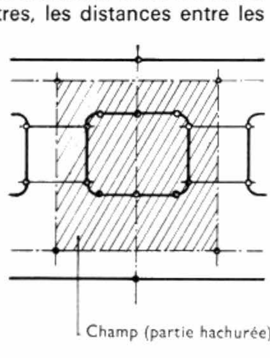


Fig. VI-7 a

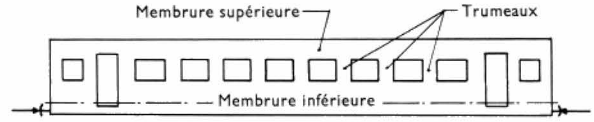


Fig. VI-7 b

points à choisir, supposés critiques sur les bords des ouvertures et le milieu du champ.

Pour chaque trumeau il faut indiquer : la largeur du trumeau, les différences éventuelles de niveau des bords supérieurs des ouvertures adjacentes au trumeau considéré, les distances entre les bords du trumeau et son axe neutre, la distance entre les sections horizontales choisies dans le trumeau et l'axe neutre de la membrure supérieure.

Toutes ces données sont inscrites sur trois imprimés spécialement établis pour le calculateur électronique.

Dans le programme sont incluses les constantes du matériau sous forme du rapport du module d'élasticité au module de glissement. Après un contrôle préalable, les feuilles ainsi établies sont programmées sur cartes perforées et introduites dans le calculateur qui fournit la solution des systèmes d'équations et la valeur des contraintes aux points choisis. Ces résultats sont comparés avec ceux obtenus aux bancs d'essais sur une caisse prototype. Leur interprétation peut donner lieu à des modifications de structure dont bénéficieront les véhicules de série.

2.4. Constructions en acier

2.4.1. Généralités. — On voit apparaître l'acier dans la construction des voitures de chemins de fer peu après la découverte du convertisseur Bessemer et du procédé Martin, au milieu du XIXe siècle. Avant cette époque, dans leur structure, leur conception et leur mode de fabrication les véhicules ferroviaires s'inspiraient des techniques en usage pour les diligences qui étaient entièrement construites en bois. Dans une première étape l'acier est associé au bois pour les structures résistantes de la caisse et du châssis, puis apparaissent les voitures semi-métallisées où le châssis est en acier et la caisse en bois, renforcée jusqu'au niveau de la ceinture par une armature métallique.

Il semble que l'étude de la première voiture tout acier construite en France remonte à 1923. Il s'agissait d'un véhicules à portières latérales, de 21 m de longueur, construit par la Compagnie des chemins de fer du Nord dans ses ateliers d'Hellemmes.

Puis apparurent en 1925 les voitures métalliques à rivets apparents étudiés par l'Office central des études du matériel (O.C.E.M.) qui furent construites en grandes séries et acquises par les Chemins de fer de l'État puis par les compagnies P.L.M. et P.O. C'est une voiture à couloir latéral dont la version troisième classe est transformable en voiture sanitaire. Sa masse, ou *tare*, est de 43 t. L'ensemble est conçu comme une poutre en treillis constituée par un plancher et ce sont les deux faces qui en assurent la rigidité.

À la même époque la Compagnie des chemins de fer du Nord étudiait une voiture à couloir latéral et intercirculation destinée aux trains rapides. Elle était réalisée en tôle emboutie au moyen d'assemblages rivés et soudés dans laquelle la structure du pavillon supportait une partie des efforts. C'est probablement la première voiture tubulaire construite en France, bien qu'à cette époque une voiture du même genre ait été étudiée, en partant du principe de construction tubulaire, par le service des Études du matériel de la Compagnie des chemins de fer de l'Est.

Les progrès de la sidérurgie associés à ceux des procédés de soudure apporteront désormais une simplification dans les modes d'assemblage des éléments jusqu'alors essentiellement rivés.

2.4.2. Caractéristiques des aciers utilisés. — L'acier utilisé est obtenu par le procédé Thomas, amélioré par le chauffage à l'oxygène, ou par le procédé Martin, ce qui confère au produit une certaine pureté chimique et donne toute garantie en ce qui concerne la constante des propriétés mécaniques imposées par les spécifications techniques. La quantité de carbone est maintenue rigoureusement à une faible valeur ; elle correspond à un faible pourcentage pour permettre une bonne soudabilité.

Les nuances utilisées sont les suivantes :

a) Pour les aciers de forge :
AF 37, AF 42, AF 50, AF 60, AF 70.

b) Pour les produits laminés :
A 33, A 34, E 24, E 26, E 30, E 36, A 50, A 60, A 70.
Les caractéristiques chimiques et mécaniques de ces aciers sont définies par les normes.

c) Pour les pièces sollicitées dans toutes les directions, deux catégories d'acier ont été retenues : acier A et acier B dont les caractéristiques sont indiquées ci-après :

la réalisation des pliés constituant l'armature résistante du châssis et de la caisse. Il en est résulté une réduction appréciable des épaisseurs des profilés, ce qui a permis d'utiliser largement la soudure électrique par points pour les assemblages. De la sorte, il a été possible de réduire la masse de la caisse d'environ 4 t par rapport à la construction en acier ordinaire. Cet allégement de la tare n'est pas sans intérêt si l'on considère que pour un train remorqué de 400 t le gain peut atteindre une voiture en comparaison d'un train de même capacité composé de voitures construites en acier ordinaire.

Désignation de l'acier	Caractéristiques mécaniques				Composition chimique (V. t. 3, Métaux et alliages)		
	R (hectobars)	*A*	Résilience (décajoules par centimètre carré)		*C*	P	*S*
			KV (en long)	*KuF* (en travers)			
Acier A	33 - 41	⩾ 30 %	3,5	7 minimum	0,15 à 0,17 %	0,04 %	0,05 %
Acier B	41 - 49	⩾ 27 %	3,5	5 minimum	0,18 à 0,20 %	0,04 %	0,05 %

d) Pour les tôles destinées à l'emboutissage il y a lieu de distinguer :

— les tôles minces laminées à froid. Dans cette catégorie on utilise les nuances TC et E ;

— les tôles minces laminées à chaud comprenant les catégories CC et 2 C ;

— les tôles moyennes et fortes dont les nuances 10 C et 12 C sont les plus utilisées.

Les caractéristiques de ces aciers sont définies par les normes.

À l'acier ordinaire ont succédé des aciers plus élaborés aux caractéristiques élevées. Dans ces catégories il convient de citer les aciers mi-durs et les aciers semi-inoxydables dans lesquels ont été introduits des éléments tels que le cuivre, le nickel, le chrome ou le molybdène qui donnent au produit une résistance à la corrosion et une résistance mécanique accrues (pouvant atteindre 60 hbar pour certaines catégories). Ces qualités d'acier ont été largement utilisées dans la construction des dernières voitures de grand confort dont certains éléments, tels les tôles de face de pavillon et des bouts, sont constitués en tôle d'acier Martin.

L'absence de corrosion de l'acier 18-8 a permis de réduire considérablement les frais d'entretien et de nettoyage. La suppression des travaux de peinture à la construction est un avantage supplémentaire si l'on compte que la protection contre l'oxydation, pour une voiture construite en acier ordinaire, nécessite l'emploi de 1 500 kg de produits à la construction. L'acier 18-8 étant inaltérable dans le temps, l'aspect extérieur des voitures se trouve amélioré et donne à l'ensemble une esthétique assez agréable mise en valeur par les ondulations longitudinales et horizontales des faces.

C'est ainsi qu'après les automotrices Budd des Chemins de fer de l'État, l'acier 18-8 a été réservé à la construction des voitures de prestige. Ces voitures sont apparues en 1950 sur les lignes de la S.N.C.F. et depuis cette date, certains trains comme le « Mistral » sont toujours constitués de véhicules en acier inoxydable. À son passif, il faut cependant inscrire son prix relativement élevé qui augmente d'une façon sensible le coût de la voiture. Après que l'on ait remédié à la tendance aux vibrations des caisses à certaines vitesses (constatées sur les premières constructions), l'emploi de ce matériau s'est généralisé sur les grandes relations et la desserte des banlieues (la fréquence des arrêts impose de grandes accélérations, ce qui nécessite une recherche poussée de l'allégement sans compromettre la sécurité).

Caractéristiques des aciers semi-inoxydables utilisés dans la construction des voitures

Catégorie de l'acier	Caractéristiques mécaniques			Composition chimique							
	Résistance à la rupture (hectobars)	Limite élastique (hectobars)	Allongement (pourcentage)	C	Mn	Cr	P	S	Ni	Cu	Si
AC 37	36 à 44	22 à 24	21 à 25	⩽ 0,22			⩽ 0,055	⩽ 0,055	⩽ 0,01	0,25 à 0,40	0,10 à 0,55
AC 52	51 à 61	⩾ 35	18 à 22	⩽ 0,22	⩽ 1,5	⩽ 0,1	⩽ 0,055	⩽ 0,055	⩽ 0,01	0,25 à 0,40	0,55
Corten	45 à 48	31,5 à 32,5	⩾ 22	⩽ 0,12	0,2 à 0,5	0,3 à 1,35	0,7 à 0,15	⩽ 0,05	⩽ 0,65	0,25 à 0,55	0,25 à 0,55
Tenapso	⩾ 47	⩾ 34,5	⩾ 25	⩽ 0,10	0,40 à 0,60		0,10 à 0,18	⩽ 0,03		0,30 à 0,40	

2.5. Construction en acier inoxydable

Généralités. — C'est en 1933 qu'apparurent aux États-Unis d'Amérique les premières voitures construites en acier inoxydable par le procédé Budd. Il fut introduit en France en 1937 par la firme Carel et Fouché pour la construction des automotrices Paris-Le Mans des Chemins de fer de l'État.

Les propriétés mécaniques de l'acier inoxydable 18-8 (18 % de chrome, 8 % de nickel) sont très bonnes. La limite élastique de ce matériau atteint 85 hbar dans la qualité demi-dure qui est plus spécialement utilisée pour

2.6. Construction en alliages d'aluminium

2.6.1. Généralités. — L'alliage léger est encore assez peu utilisé en France pour la construction du matériel ferroviaire. En Suisse, en Allemagne et en Espagne quelques réalisations ont dépassé le stade expérimental (Chemin de fer du Brunig, Talgo). En France, l'utilisation de l'alliage léger apparaît sur les premières voitures métalliques étudiées en 1923 par la Compagnie des chemins de fer du Nord. Dans un souci d'allégement, la tôle d'aluminium est utilisée pour la confection du pavillon extérieur

Caractéristiques des aciers inoxydables utilisés pour la construction des voitures

État	Caractéristiques mécaniques			Composition chimique (pourcentages)									Utilisation
	Résistance à la rupture en hectobars	Limite élastique en hectobars	Allongement	Cr	Ni	Cr + Ni	C	Mn	Si	Cu	P	S	
Adouci ..	50 à 65		45 %	17 à 19	⩾ 8		0,08	1,5	⩽ 1,5		0,04	0,035	Tôlage des faces
1-4 dur ..	60 à 80		35 %	17 à 19	⩾ 8		0,08	1,5	⩽ 1,5		0,04	0,035	Pavillon
1-4 dur ..	80 à 90		30 %	17 à 19	6,5 à 8,5	⩾ 23,5	0,08 à 0,15	⩽ 1,5	⩽ 1,5	⩽ 0,5	⩽ 0,04	⩽ 0,035	Fabrication des ondulés et moulures
1-2 dur ..	95 à 115	⩾ 85	18 %	17 à 19	6,5 à 8,5	⩾ 23,5	0,08 à 0,15	⩽ 1,5	⩽ 1,5	⩽ 0,5	⩽ 0,04	⩽ 0,035	Pour étirés et pliés d'ossature

et le panneautage des cloisons et de séparation des faces. Dans le même but d'allégement, les Chemins de fer de l'État l'utilisent plus largement sur du matériel de banlieue à étage, en 1936, et sur des voitures de grandes lignes dites « allégées » qui ne pèsent que 35 t. Le panneautage intérieur des faces et des cloisons est alors constitué par des feuilles en alliage d'aluminium. Les difficultés d'entretien dues au manque de matière première pendant la seconde guerre mondiale obligent à remplacer progressivement ces panneaux sur la totalité des voitures. À cette énumération, il faut ajouter une rame rapide, remorquée par une locomotive au fuel, qui a assuré pendant la période 1948-1956 la relation Paris-Strasbourg.

L'expérience acquise, limitée à ces quelques exemples, n'avait pas incité la S.N.C.F. à poursuivre dans cette voie. Il a fallu la mise sur le marché d'alliages d'aluminium nouveaux, aux propriétés mécaniques améliorées, certaines étant comparables à celles de l'acier, pour entreprendre une nouvelle étude motivée en grande partie par la nécessité de réaliser un allégement sur des matériels de construction récente dont la masse dépasse 50 t en raison des perfectionnements de plus en plus importants qu'ils comportent.

C'est ainsi que sous l'impulsion de la Direction du matériel de la S.N.C.F., une voiture construite entièrement en aluminium a été réalisée avec la collaboration de « l'Aluminium français ». Il s'agit d'une voiture conventionnelle de 24,500 m de longueur et 17,200 m d'empattement, destinée au service des repas. Pour cette construction, des profilés ont été créés spécialement pour tenir compte du faible module d'élasticité de ce matériau (1/3 de celui de l'acier ordinaire). Cette voiture qui a été calculée par la méthode O.R.E. a suivi avec succès les essais de compression et de choc réglementaires au banc d'essais de Vitry-sur-Seine. Les épreuves de tamponnement réalisées à vitesse inférieure à 10 km/h ont mis en évidence l'aptitude de la construction en alliage d'aluminium à absorber l'énergie libérée au moment du choc. Les extrémités du châssis ont été étudiées pour recevoir l'attelage automatique.

L'allégement obtenu par rapport à une construction en acier est très important (de l'ordre de la moitié) ; si l'expérience est poursuivie, il permettra une réduction de la tare des voitures-restaurant devenues trop lourdes à la suite de l'installation à bord de cuisines de plus en plus perfectionnées. Les voitures de grand confort construites en acier semi-inoxydable pourront, par la suite, bénéficier de cet allégement. Il reste bien entendu à étudier le comportement de cette voiture en service avec les problèmes d'entretien qu'elle est susceptible de poser. Il convient également de souligner le coût élevé de la construction en alliage d'aluminium qui atteint trois fois celle de l'acier en ne considérant que le prix de la matière.

2.6.2. Alliages d'aluminium utilisés

1° *Produits corroyés*

— *Produits plats*

• AZ 5 G, état T 6, trempé et revenu : cet alliage est autotrempant. Il conserve en grande partie ses caractéristiques mécaniques à l'état soudé. Il a été utilisé pour tous les produits plats, sauf la tôle de revêtement du pavillon et les parties supérieures des parois latérales comprenant les emboutis de baies.

• AG 3, état H 24 (ce qui signifie que la dureté du produit a été augmentée pour permettre la déformation à froid) : ce matériau a été utilisé pour le revêtement du pavillon et pour la partie supérieure des parois latérales comportant les emboutis de baies.

Le soudage fait localement disparaître l'écrouissage (abaissement local des caractéristiques mécaniques, la rigidité de l'ensemble étant conservée, ce qui est suffisant pour les tôles de revêtement).

— *Produits filés*

• AZ 5 G, état T 6 : cet alliage a été utilisé pour toute la structure en produits filés.

• A 5 GM, état T 6 : la résistance mécanique est localement affaiblie par la soudure ($R = 20$ hbar) ; cette catégorie de produits a été utilisée pour la réalisation des profilés de revêtement de plancher assemblés par rivetage.

2° *Produits coulés*

— AZ 5 G, état Y 25 (c'est-à-dire coulé en sable et, stabilisé pendant dix heures à 180 °C) : cet alliage est auto-

Caractéristiques mécaniques et composition chimique des alliages d'aluminium utilisés pour la construction de la voiture prototype

Désignation de l'alliage	Caractéristiques mécaniques			Composition chimique (pourcentages)												
	R (hectobars)	*LE* (hectobars)	*A*	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Zn	Cr	Ti	Zr	Ni	Pl	Sn	Al
AZ 5 G (état T 6)	34 (1)	27,5 (2)	10%	⩽ 0,1	0,9 à 1,4	⩽ 0,3	⩽ 0,4	⩽ 0,3	4,1 à 4,9	0,15 à 0,35	⩽ 0,1	0,05 à 0,25				le reste
AG 3 (état H 24)	24	18	7%	⩽ 0,1	2,6 à 3,8	⩽ 0,4	⩽ 0,5	0,1 à 0,6	⩽ 0,2	⩽ 0,4	⩽ 0,2					le reste
A5GM (état T 6)	28	24	10%	⩽ 0,1	0,6 à 1,4	0,6 à 1,6	⩽ 0,5	0,1 à 1	⩽ 0,25	⩽ 0,3	⩽ 0,2					le reste
AZ 5 G (état Y 26)	20	14	3,5%	0,15 à 0,35	0,4 à 0,65	⩽ 0,3	⩽ 0,8	⩽ 0,4	4,5 à 5,5	0,15 à 0,35	0,15 à 0,25		⩽ 0,05	⩽ 0,05	⩽ 0,05	le reste

(1) 33 hbar à l'état soudé. (2) 22 hbar à l'état soudé.



Fig. VI-8

Aménagement intérieur d'une voiture grand confort (*S.N.C.F.*)

trempant et conserve ses caractéristiques après soudage. Il a été utilisé pour le moulage des traverses pivots, des consoles de suspension de caisse et des béquilles d'entraînement et de guidage des bogies, ces pièces étant assemblées par boulons au châssis.

Les bouts de caisse, les supports d'aérateurs ainsi que certaines pièces de tamponnement ont été réalisés avec ce matériau.

3. AMÉNAGEMENT DE LA CAISSE (fig. VI-8 et hors-texte)

3.1. Généralités. — La caisse étant déterminée dans ses dimensions et ses assemblages suivant les principes développés précédemment, on procède alors au garnissage intérieur. Par garnissage il faut comprendre : le panneautage et le revêtement intérieur des faces, le montage des cloisons, s'il y a lieu, la disposition des sièges, et le montage des accessoires.

Ces éléments doivent être traités à la fois sur les plans artistique et technique de façon à satisfaire la clientèle en lui apportant un certain nombre de commodités dont quelques-unes originales quand il s'agit de relations à grand confort, par exemple. Le décorateur a la charge de définir un cadre agréable à l'intérieur et de donner au véhicule un aspect extérieur qui doit s'inscrire d'une manière esthétique dans un ensemble cohérent. L'insonorisation, dont on se préoccupait assez peu sur les premières constructions métalliques du fait que celles-ci succédaient aux voitures en bois ou semi-métallisées assez peu sonores, a fait l'objet d'études poussées au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse des trains.

Dans les voitures modernes, de type U.I.C. de nombreux matériaux sont mis en œuvre.

3.1.1. Matériaux traditionnels

— acier ordinaire : châssis, membrures de caisse, panneautage extérieur, pavillon, etc. ;

— acier inoxydable : porte-bagages, cadres photographiques et publicitaires, portemanteaux, porte-chapeaux ;

— alliage d'aluminium oxydé anodiquement : plinthes, poignées de porte, mains courantes, cendriers, plaques d'inscriptions intérieures ;

— bois traité façon hydrofuge : frises et lambourdes de plancher et de face ;

— contreplaqué en diverses épaisseurs : cloisons de séparation, plancher et panneautages ;

— caoutchouc : revêtement de sol, joints d'étanchéité ;

— linoléum : revêtement de sol ;

— moquettes : revêtement de sol en première classe ;

— carreaux de céramique : revêtement de sol des locaux sanitaires et des cabinets de toilette ;

— drap : habillage des sièges et de panneaux garnis dans les voitures de première classe ;

— mousse de latex : confection des coussins et dossiers (à la place de crin et de laine) ;

— tissu vinylique : habillage des sièges dans les voitures de deuxième classe ;

— glaces-miroirs simples ou doubles : dans les cabinets de toilette et pour les baies de compartiments et de portes.

3.1.2. Matériaux plus récents

— les produits lamifiés utilisés pour le revêtement intérieur ;

— les plastiques moulés ;

— le polyester (verrannes enduites de résines) ;

— le polychlorure de vinyle.

3.1.3. Matériaux d'isolation. — Un certain nombre de produits sont également utilisés pour l'isolation thermique et phonique de la voiture. Ce sont :

— les produits bitumeux contenant de l'amiante et du caoutchouc dont on enduit les surfaces métalliques. Ils assurent en même temps une protection anticorrosive ;

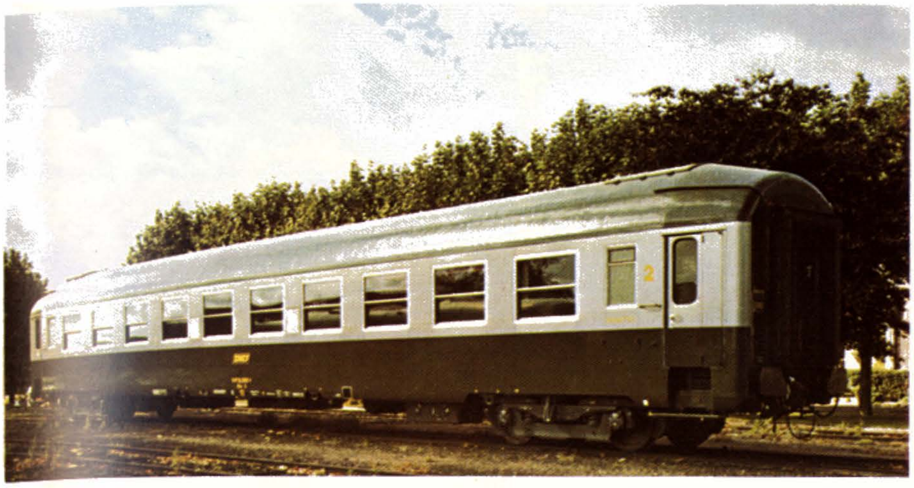
— la fibre minérale, laine de verre ou de roche interposée entre la face interne de la tôle de face, enduite de produit bitumeux, et le garnissage intérieur des faces ;

— le feutre asphalté ignifugé utilisé dans la constitution du plancher ;

— les peintures (elles sont de moins en moins utilisées à l'intérieur des voitures depuis l'apparition des lamifiés et revêtements plastiques).

3.2. Sièges. — Ils sont en constante évolution dans leurs formes et dans leur conception. Le galbe des dossiers fait l'objet de recherches permanentes pour assurer au voyageur le maximum de bien-être. Pour leur fabrication on utilise des matériaux de qualité (drap en première classe et tissu vinylique en deuxième classe) dans des coloris choisis par un décorateur. Le garnissage intérieur des sièges est réalisé presque exclusivement en mousse de latex.

Il existe deux conceptions différentes de sièges suivant qu'ils sont destinés à une voiture à compartiments ou à couloir central, cela dans les deux classes. Dans le premier cas, il s'agit de deux banquettes situées de part et d'autre des cloisons de séparation. En deuxième classe, elles comportent chacune quatre places de front et les dossiers sont fixés aux cloisons de séparation. En première classe, elles comportent trois coussins amovibles de chaque côté ; le dossier est en général inclinable. La distance entre deux



Matériel remorqué

Ci-contre, voiture couchettes U.I.C. B9C9x.

Ci-dessous, porte d'intercirculation à double vantail, avec raccords à bourrelets.



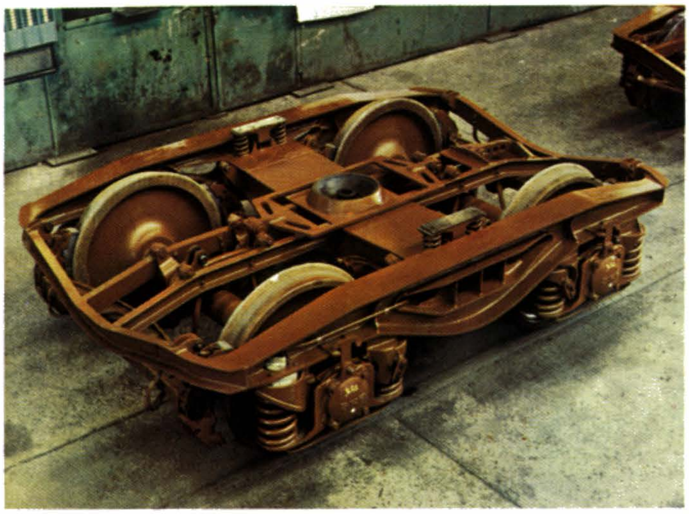


Ci-dessus, voiture de grand confort : garnissage intérieur.

Ci-dessous, voiture gril-express.



Photos : S.N.C.F.





Ci-dessus, bogie standard Y 25 Css pour wagon à deux bogies, utilisable jusqu'à la vitesse de 120 km/h.

Ci-contre, conteneur spécialisé pour produits chimiques.

Ci-dessous, manège de soudure des châssis de bogies Y 25.



Photos : S.N.C.F. Fauvet-Girel.

sièges permet une relaxation complète. La tendance générale actuelle est de remplacer, en deuxième classe, la banquette traditionnelle à quatre places par trois sièges indépendants pouvant se transformer en couchette. Cette conception tend à se généraliser sur le matériel moderne.

3.3. Locaux sanitaires. — Ils sont l'objet de soins particuliers de la part des administrations qui souhaitent offrir au voyageur un confort accru. En général, les toilettes comportent, en plus de la cuvette munie d'un clapet manœuvrable par pédale actionnant simultanément la chasse d'eau, un lavabo avec eau chaude et froide distribuée par robinet commandé à distance (ainsi l'installation est à l'abri des destructions par gel). La prise pour rasoir électrique alimentée sous une tension de 220 V- 50 Hz est maintenant très répandue sur le matériel. Les porte-serviettes sont de plus en plus remplacés par des boîtes à serviettes en papier cellulosique qui sont jetées après usage dans une boîte à déchets. Les miroirs, bien souvent à trois faces à éclairage approprié, complètent l'installation. Les réservoirs d'eau d'une capacité de 400 l, contenance imposée par l'U.I.C., sont généralement constitués en résines polyester de forte épaisseur et calorifugés au moyen de laine de verre, ce qui permet l'utilisation des installations sanitaires par temps froid.

3.4. Intercirculation. — Les premières voitures de chemin de fer ne comportaient pas de possibilité de passage d'une voiture dans une autre. Les voitures à essieu de 14,200 m de longueur dites « Bacalan », mises en service en 1897 sur les Chemins de fer de l'Ouest, ont été vraisemblablement parmi les premières à être équipées d'un système complet d'intercirculation viable.

À l'origine, l'intercirculation répondait d'abord à une nécessité de service, celle du contrôle. Les véhicules étaient alors munis à leurs extrémités de passerelles basculantes qui se recouvraient partiellement lorsqu'elles étaient rabattues. Des mains-courantes extensibles assuraient une protection assez sommaire. Ce système existe encore sur des voitures de banlieue à bogies actuelles. Dans le système dit international les passerelles sont toujours fixes mais rabattables et les bouts sont équipés de soufflets fermés.

Puis apparaît la passerelle oscillante qui est également rabattable mais qui peut s'orienter dans les courbes et contre-courbes autour d'un axe fixe. Cette innovation a apporté un certain progrès par rapport à la disposition ancienne. Le soufflet subsiste bien entendu ; il peut s'accoupler avec son vis-à-vis au moyen d'un cadre métallique suspendu élastiquement, muni de loqueteaux. L'ensemble est repliable sur les bouts de la voiture. Cette disposition a prévalu pendant quelques décennies ; sur les matériels nouveaux elle a été remplacée par des raccords à bourrelets constitués par trois tubes cylindriques en caoutchouc formant un U qui s'aplatissent au moment de l'accouplement de deux voitures. Une passerelle légèrement orientable assure la fermeture de l'ensemble à la partie basse.

Les portes d'intercirculation sont maintenant à double vantaux manœuvrables à la main mais comportent un rappel pour la fermeture. Sur les voitures T.E.E. (Trans Europe Express) de la S.N.C.F., ces portes sont commandées automatiquement, sans l'intervention du voyageur, à l'ouverture et à la fermeture. Cette disposition évite des déperditions calorifiques importantes en saison hivernale (V. hors-texte).

3.5. Intercommunication pneumatique. — C'est essentiellement un système de sécurité qui est mis à la disposition des voyageurs en cas de danger. En exerçant une traction sur une poignée de secours, le voyageur met la conduite générale de frein à l'atmosphère par l'intermédiaire d'une soupape à grand débit et réalise ainsi un freinage d'urgence du train. Ces poignées sont réparties dans la voiture à raison d'une par compartiment. Dans le couloir, elles sont généralement au nombre de quatre, placées au-dessus des baies. En même temps que le freinage est déclenché, un sifflet entre en action pour permettre l'identification de la voiture où a eu lieu l'incident.

4. BOGIES

4.1. Généralités. — L'accroissement de la longueur des voitures, consécutif à l'augmentation de leur capacité, a eu pour première conséquence de faire apparaître des difficultés d'inscriptions dans les courbes. De la voiture à deux essieux on est passé à la voiture à trois essieux dont l'axe médian était doté d'un jeu transversal important afin d'absorber la flèche dans les courbes. Rapidement, cette amélioration devint insuffisante et il fallut s'orienter vers l'adoption de deux petits châssis porteurs, appelés bogies, comportant chacun deux essieux d'empattement réduit, s'articulant autour d'un pivot à chaque extrémité de la voiture. Cette innovation apparut au début du siècle en France sur une voiture de la compagnie P.L.M. de 20 m de longueur hors tout.

Depuis cette époque, le système s'est perfectionné au travers d'un certain nombre de générations de bogies dont le plus répandu a été celui du type Pensylvania qui équipe encore actuellement un grand nombre de voitures de la S.N.C.F. Il est constitué par un châssis rectangulaire prenant appui, par l'intermédiaire de quatre groupes de ressorts en hélice, sur deux balanciers latéraux dont les extrémités reposent sur les dessus de boîtes d'essieux. La suspension secondaire est assurée par deux groupes de ressorts à pincettes (un de chaque côté dans le milieu) en appui sur un sommier oscillant latéralement. Ces ressorts reçoivent la charge qui leur est transmise par une traverse danseuse, ayant un certain degré de liberté latéral, sur laquelle s'adapte le pivot.

La rotation en courbe s'effectue au niveau du pivot par l'intermédiaire d'un grain de frottement. Une cheville clavetée rend l'ensemble solidaire du châssis de la voiture.

4.2. Description des différents types de bogies

1° Le bogie Y 16 qui équipait les voitures dites de démarrage au lendemain de la deuxième guerre mondiale a été le dernier bogie du type Pensylvania de grande diffusion construit pour le matériel voyageurs. L'expérience a montré que ce type de bogie est bien adapté pour des vitesses ne dépassant pas 120 km/h mais que son comportement à 140 km/h est assez irrégulier et varie en fonction de la qualité de l'entretien. Aussi a-t-on été amené à étudier d'autres types de bogies dont les suivants immédiats sont dérivés du type Pensylvania.

2° Le bogie Y 20 qui a succédé au bogie Y 16 a été étudié pour circuler à une vitesse voisine de 140 km/h. Dans cette version on retrouve les balanciers dont les extrémités comportent un logement pour recevoir les boîtes à rouleaux. L'ensemble non suspendu ainsi formé est indéformable et lié au châssis de bogie par des bielles d'asservissement munies d'articulations avec « silentbloc ». Il comporte également deux étages de suspension réalisés au moyen de ressorts à hélice, mais au deuxième étage la charge est répartie en trois points (deux latéraux, un central) sur les premiers modèles puis sur deux lisoirs latéraux dans les versions les plus récentes. Cette disposition a pour but de diminuer l'effet de lacet du bogie en créant un couple de frottement. Le pivot subsiste sur la traverse danseuse qui est elle-même asservie par bielle au châssis de bogie. Le rappel transversal, sous le contrôle d'un amortisseur hydraulique, est obtenu par la déformation des ressorts de suspension secondaire.

Ce bogie a été largement diffusé en diverses variantes, notamment celle équipée du frein à haute puissance destinée aux équipements pour les relations à grande vitesse (jusqu'à 160 km/h). Avec le recul du temps, il est permis de constater qu'il a constitué un progrès très important au point de vue confort par rapport à ses devanciers.

3° Les bogies Y 24 et Y 26 qui ont suivi présentent les mêmes caractéristiques générales de conception que le bogie Y 20 ; cependant des modifications ont été imposées par le freinage à haute puissance pour la circulation à très grande vitesse. C'est ainsi que le bogie Y 24 qui équipait les premières voitures du Capitole possédait, en plus de son équipement de frein autonome, un freinage par patins magnétiques qui a le mérite de ne pas solliciter l'adhérence des roues sur le rail ; cela est très appréciable pour les vitesses supérieures à 160 km/h. Quant au bogie Y 26 il a

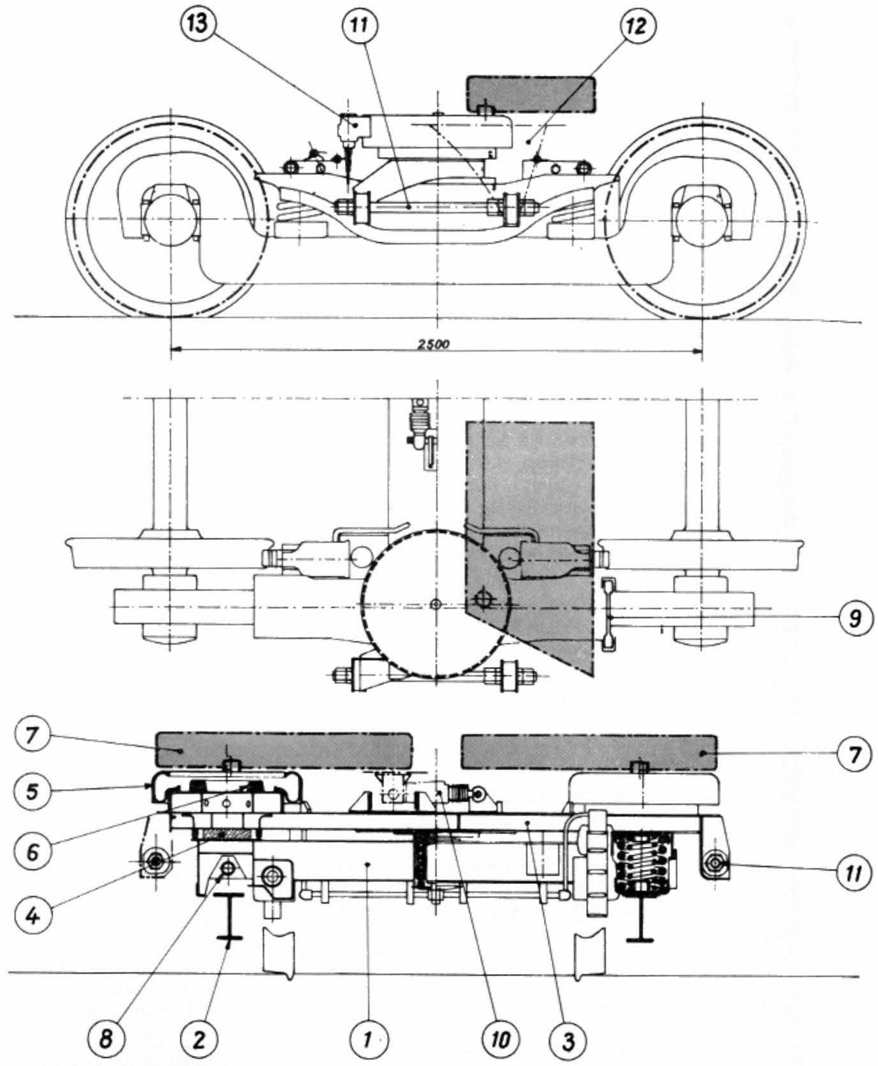


Fig. VI-9
Bogie Y 26 P

1. Châssis en tôle soudée
2. Balancier équilibreur en tôle soudée
3. Traverse pivotante
4. Glissoirs
5. Coussins pneumatiques
6. Blocs de sécurité en caoutchouc
7. Réservoirs des coussins pneumatiques
8. Bielle d'asservissement longitudinal
9. Bielle d'asservissement transversal
10. Amortisseur transversal
11. Bielle de liaison (bogie-caisse)
12. Console de caisse
13. Valve de nivellement

Masse totale du bogie : 4,800 t

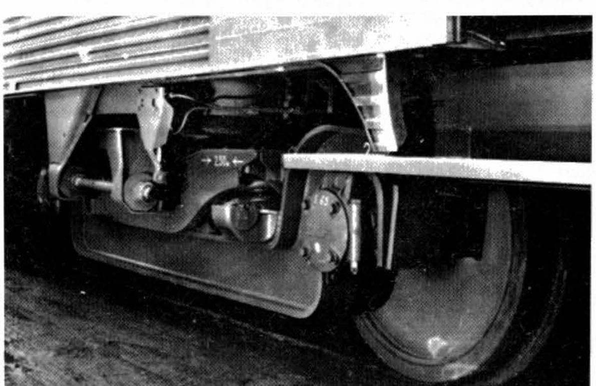


Fig. VI-10 — Bogie Y 26 P (*S.N.C.F.*)

été étudié pour recevoir les nouveaux systèmes de freinage à semelles composites, ce qui a eu pour conséquence de simplifier la timonerie du frein. Ces semelles composites présentent un avantage important : pendant le freinage, elles permettent d'obtenir un coefficient de frottement élevé et constant, ce qui évite l'emploi du frein à deux étages de pression.

4° Dans la version Y 26 P (fig. VI-9 et VI-10) la suspension secondaire est réalisée par coussins d'air placés aux extrémités de la traverse de charge, ce qui entraîne une atténuation des vibrations et un filtrage des bruits. De plus, dans l'étude de ce bogie, dans le but d'améliorer la stabilité, on s'est efforcé de placer les bielles d'asservissement dans le plan des essieux, le plus près possible du centre de gravité du bogie. Le bogie Y 26 P équipe les voitures-restaurant les plus récentes.

5° Le bogie Y 28 (fig. VI-11 et VI-12) est la synthèse de deux idées directrices :

— suppression du pivot afin d'éliminer le couplage par frottement entre le bogie et la caisse ;

— obtention de fréquence de liaison transversale caisse-bogie inférieure à celle du mouvement de lacet auquel est soumis le bogie.

En application de ces deux principes, les liaisons entre la caisse et le bogie ont été résolues de façon originale. La charge est transmise par une bielle de grande longueur, à rotules, à chacune des extrémités d'une traverse de charge

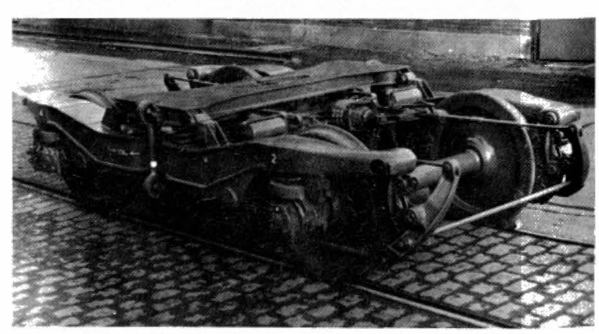


Fig. VI-11 — Bogie Y 28 F (*S.N.C.F.*)

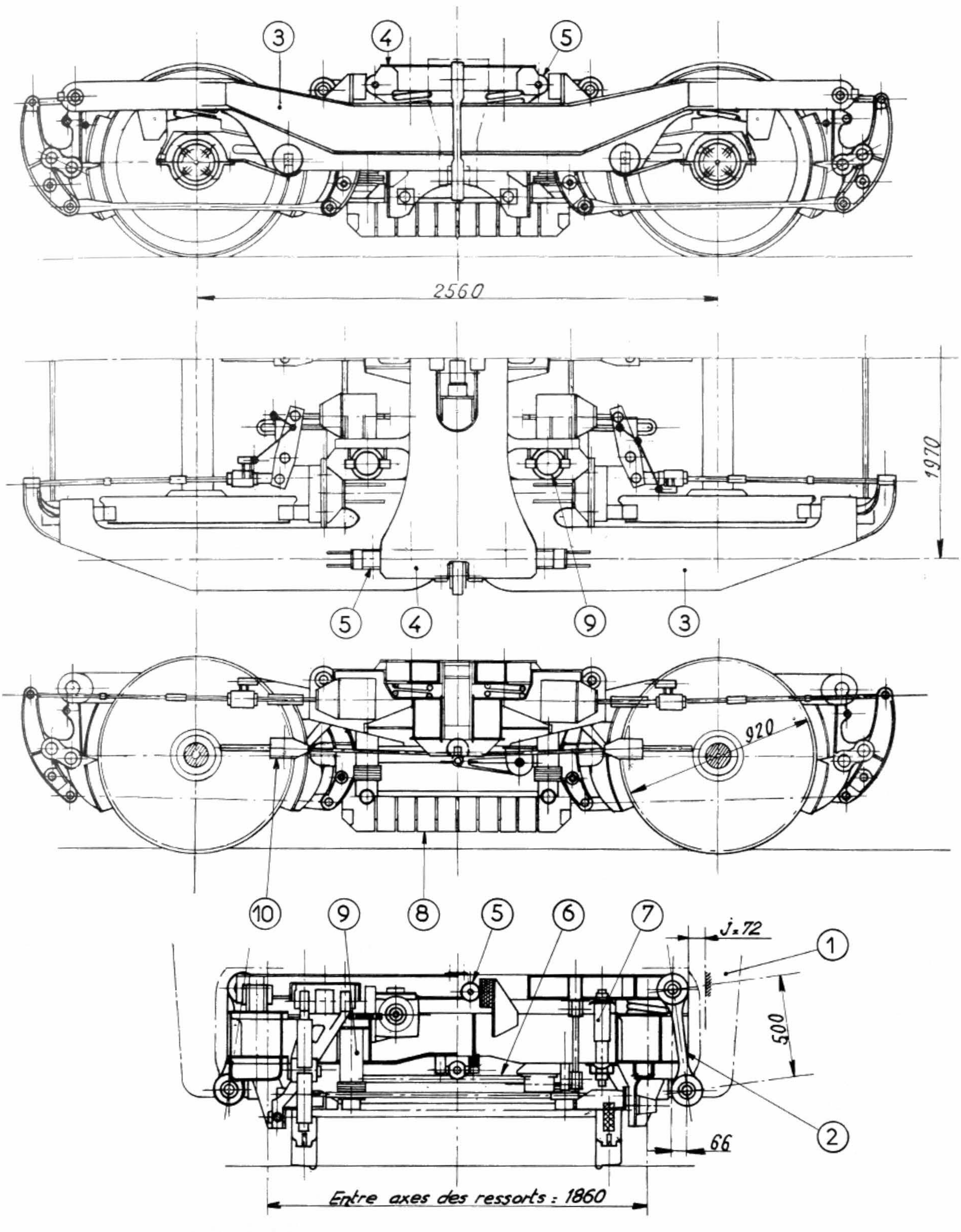


Fig. VI-12 — Bogie Y 28 F

1. Console de caisse
2. Bielle de suspension
3. Châssis de bogie en tôle soudée ; extrémité des longerons en acier moulé
4. Traverse de charge
5. Galets de guidage de la traverse de charge
6. Barre antiroulis
7. Amortisseur vertical
8. Patin du frein électromagnétique
9. Suspension du patin
10. Câble de liaison du châssis de bogie à la caisse

Masse du bogie : 6,300 t

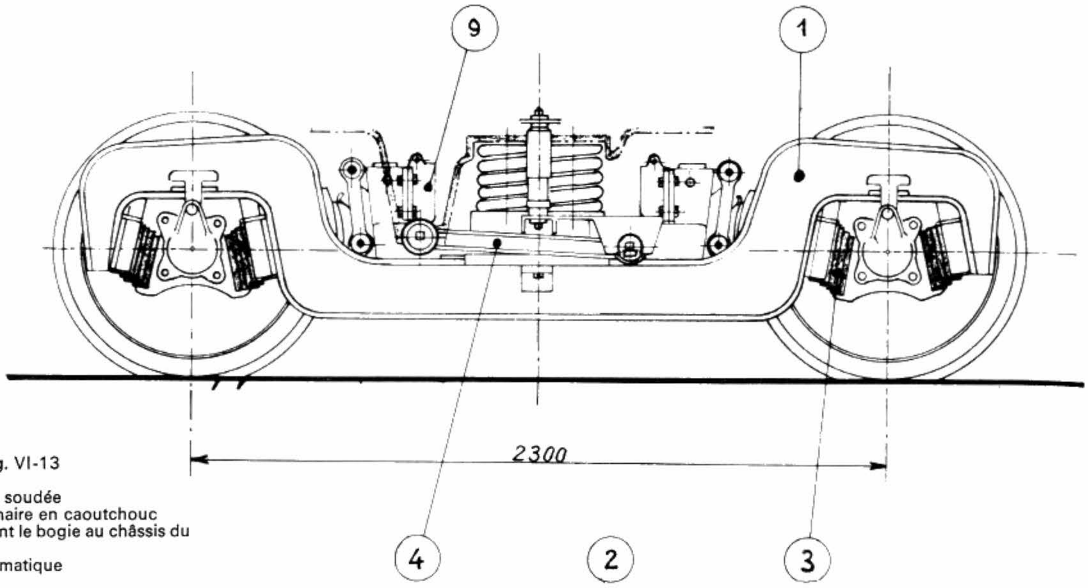


Fig. VI-13

1. Châssis en tôle soudée
2. Suspension primaire en caoutchouc
3. Bielle asservissant le bogie au châssis du fourgon
4. Bloc-frein pneumatique

guidée longitudinalement et transversalement par galets en céloron. Celle-ci transmet les efforts verticaux au châssis de bogie en forme de H par deux groupes de ressorts en hélice qui constituent l'étage secondaire de la suspension. Le débattement transversal de la caisse à l'extrémité des bielles longues est important (± 70 mm). L'entraînement du bogie est réalisé par câble élastique placé dans le plan des corps d'essieu dans l'axe de la voiture.

Dans la version la plus évoluée, une barre antiroulis contrôle les oscillations de la traverse de charge par rapport au châssis de bogie. La suspension primaire est constituée de ressorts en hélice placés entre le dessus des boîtes à rouleaux et le châssis, à l'extrémité d'un bras oscillant asservi au longeron de bogie. Les articulations d'asservissement sont montées avec des bagues en caoutchouc. Le couple de rotation est très faible et le découplage entre la caisse et le bogie a été poussé au maximum.

Sur les bogies Y 28, dont la vitesse maximale d'utilisation est 160 km/h, le freinage est obtenu par quatre blocs-freins avec semelles composites. Sur une version plus récente qui équipe les voitures de grand confort, dont la vitesse atteint 200 km/h, ce type de frein a été remplacé par un frein courant à semelles en fonte auquel a été associé en complément un frein électromagnétique. Le bogie Y 28 équipe depuis 1969 les voitures de construction nouvelle de la S.N.C.F.

6° Le bogie Y 207 possède comme le bogie Y 28 des qualités de stabilité qui lui permettent de circuler à de grandes vitesses, voisines de 200 km/h. Sa conception est tout à fait originale puisque ce bogie ne comporte pratiquement qu'un seul étage de suspension. La charge repose sur le châssis de bogie par l'intermédiaire de blocs de caoutchouc qui apportent un complément de flexibilité verticale à la suspension principale réalisée par quatre barres de torsion. Il possède également une certaine flexibilité radiale qui favorise la rotation du bogie. La charge est transmise aux boîtes d'essieu par quatre bras dont l'extrémité supérieure est calée sur les barres de torsion. L'extrémité inférieure est liée à une bielle en forme de C de 500 mm de longueur dont le bec supérieur prend appui par une articulation en couteau sur le dessus de boîte, réalisant ainsi un rappel pendulaire transversal de ± 65 mm. Une autre particularité importante du bogie Y 207 réside dans l'obtention de masses non suspendues transversalement inférieures à celles des bogies existants, ce qui le rend particulièrement apte à la circulation aux grandes vitesses.

Le châssis est muni de barres antiroulis. Les boîtes d'essieu sont fixées à un cadre en forme de H dont la déformation permet d'absorber les gauches de la voie. La faible orientation de l'essieu par rapport à ce cadre est obtenue par des anneaux en caoutchouc placés entre le corps extérieur de la boîte et leur logement aux extrémités du cadre. L'asservissement de la traverse de charge au châssis de bogie est réalisé par des câbles croisés agissant sur des systèmes élastiques, par l'intermédiaire de leviers. Ce bogie est pourvu d'un équipement de frein perfectionné lui permettant de circuler à grande vitesse.

7° Le bogie Y 30 (fig. VI-13) possède la particularité d'avoir une suspension primaire réalisée au moyen de ressorts caoutchouc sandwichs. La suspension secondaire, de conception conventionnelle, est obtenue par des ressorts hélicoïdaux transmettant la charge au milieu des balanciers reliés l'un à l'autre d'une façon rigide par une poutre transversale. L'ensemble du châssis ainsi conçu suggère la forme de H dont l'aptitude à absorber les gauches de voie est bien connue. L'extrémité des balanciers de forme enveloppante sollicite les éléments sandwichs qui prennent appui de chaque côté de la boîte d'essieu. La liaison entre la caisse et le bogie s'exerce sensiblement dans le plan des essieux par une bielle placée de chaque côté. Les déplacements transversaux sont limités à ± 25 mm. Ce bogie est muni de roues de diamètre 840 mm et est apte à circuler à la vitesse de 160 km/h. Il équipe actuellement les fourgons transport d'automobiles à deux étages incorporés dans les trains auto-couchettes.

8° À l'étranger il existe également une grande variété de bogies ; parmi les plus connus il convient de citer :

a) *Le bogie Görlitz* utilisé par les pays de l'Europe centrale. La charge est transmise par une traverse danseuse dont les extrémités prennent appui sur de longs ressorts disposés parallèlement à la voie. La suspension primaire est également assurée par des ressorts à lames prenant appui dans leur milieu sur les boîtes. Les extrémités sont reliées au châssis par des chandelles de suspension comprimant des ressorts en hélice.

b) *Le bogie Schlieren* (fig. VI-14), de conception suisse, comporte également deux étages de suspension. La caisse de voiture s'appuie sur les extrémités d'une traverse danseuse au moyen de deux tubes munis de garnitures de frottement travaillant dans un bain d'huile à l'abri des poussières. La traverse danseuse transmet la charge sur un sommier par deux groupes de ressorts en

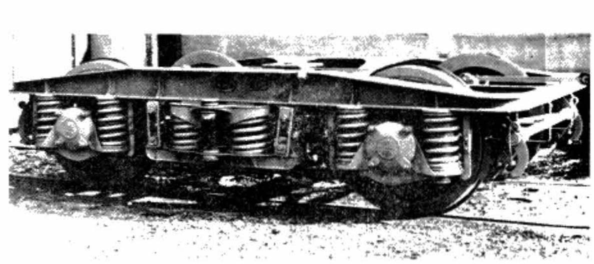


Fig. VI-14 — Bogie Schlieren

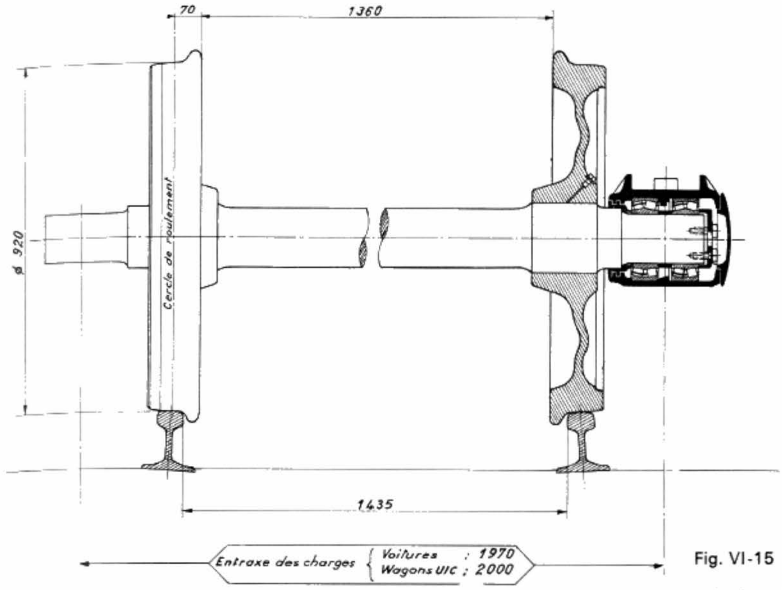


Fig. VI-15

hélice placés de chaque côté. Le sommier est relié au châssis par des anneaux oscillants inclinés constituant ainsi le système de rappel. Le pivot central d'entraînement transmet les forces horizontales entre la caisse et le bogie. L'étage de suspension primaire est réalisé par deux ressorts en hélice supportant le châssis et prenant appui sur les plateaux des boîtes d'essieux. Ce bogie est muni de deux amortisseurs obliques entre la traverse et le châssis de bogie. Ils assurent à la fois le contrôle des mouvements horizontaux et des mouvements verticaux de la traverse danseuse.

c) *Le bogie allemand Minden-Deutz* est assez voisin dans sa conception du bogie Schlieren; il n'en diffère que par la suspension secondaire. La traverse danseuse de section trapézoïdale porte le pivot et appuie par ses extrémités sur des ressorts hélicoïdaux qui transmettent la charge à un sommier articulé. L'articulation haute des anneaux est reliée à des bielles de suspension longues dont la tête supérieure, accrochée au-dessus du châssis, comporte une articulation. Le guidage de cette bielle est réalisé par des bagues en caoutchouc qui leur permettent une certaine liberté d'inclinaison. Cette disposition permet les mouvements transversaux jusqu'au contact dans les guides. Le fonctionnement de la suspension de la traverse danseuse est tel, qu'en alignement droit, celle-ci oscille avec une basse fréquence sur les couteaux de l'attache supérieure sans que les anneaux entrent immédiatement en oscillation.

4.3. Le roulement. — L'ensemble des organes de roulement comprend l'essieu monté et les boîtes d'essieu.

4.3.1. Essieu monté. — Il est constitué d'un axe et de deux roues (fig. VI-15). L'axe est cylindrique sur toute sa longueur et comporte à chacune de ses extrémités une fusée destinée à recevoir la charge par l'intermédiaire des boîtes d'essieu. Il comporte deux portées de calage sur lesquelles les roues sont emmanchées à force.

La roue est formée de plusieurs éléments :

— Le corps de roue dont la partie centrale, le moyeu, largement dimensionnée s'adapte après usinage soigné sur les portées de calage de l'axe. Le moyeu est raccordé à la toile de faible épaisseur qui se termine extérieurement par la jante. La forme oblique ou ondulée de la toile donne à la roue une certaine élasticité.

— Le bandage s'adapte par frettage à chaud sur la jante. Son profil extérieur constitue la table de roulement de la roue.

— L'agrafe, de section appropriée et de forme circulaire, maintient le bandage calé sur la jante.

L'essieu monté, ainsi constitué, est robuste et d'une grande rigidité. Les roues sont parfaitement parallèles et tournent toutes les deux à la même vitesse angulaire ; du fait de la conicité des tables de roulement, cela entraîne un mouvement parasite sinusoïdal, appelé *lacet*. Le profil extérieur du bandage est l'objet de recherches permanentes dans ses formes. Il comporte un boudin qui assure le guidage sur les rails et une pente dont la valeur varie suivant qu'il s'agit des voitures ou des wagons.

Avec l'accroissement de la vitesse et de la charge, la roue composite a été progressivement remplacée par la roue d'une seule pièce dite monobloc à toile ondulée qui présente plus de sécurité de tenue lors des freinages prolongés ou à haute puissance.

Les essieux montés sont fabriqués en acier forgé Martin. Ce sont des aciers au carbone dont les qualités et les propriétés mécaniques sont définies par des spécifications techniques rigoureuses vérifiées par des essais mécaniques, chimiques et macrographiques bien définis. Après forgeage les axes et les roues subissent des traitements thermiques avec revenu et trempe pour le bandage. Ces opérations ont pour but de réduire les tensions à l'intérieur du métal et à lui donner la résistance, l'allongement et la dureté requise.

La charge par essieu varie en fonction du diamètre des roues et de la vitesse. Pour les wagons elle atteint :

20 000 kg pour les roues de 920 mm de diamètre à la vitesse maximale de 120 km/h ;

18 000 kg pour les roues de 840 mm de diamètre à la vitesse maximale de 140 km/h ;

16 000 kg pour les roues de 760 mm de diamètre à la vitesse maximale de 140 km/h.

Pour les voitures, la charge admise est de 16 000 kg pour les roues de 920 mm de diamètre équipant tous les véhicules à bogies. La capacité d'usure correspondante est de 40 mm. Cette valeur procure à l'essieu monté une certaine longévité qui peut atteindre deux millions de kilomètres. Les progrès récents de la métallurgie, associés à des traitements thermiques appropriés, ont permis de ramener l'usure radiale admissible pour les roues de wagons à 20 mm.

En ce qui concerne les essieux de voitures, des dispositions analogues sont sur le point d'être prises à la suite de la mise en application d'un profil nouveau qui a pour but de réduire le mouvement de lacet.

4.3.2. Boîtes d'essieu (fig. VI-16). — Elles ont pour fonction de transmettre la charge sur les fusées extérieures de l'essieu monté par l'intermédiaire de roulements à rouleaux. Cette dernière disposition a remplacé presque complètement les boîtes à coussinets dont étaient équipées les anciens matériels.

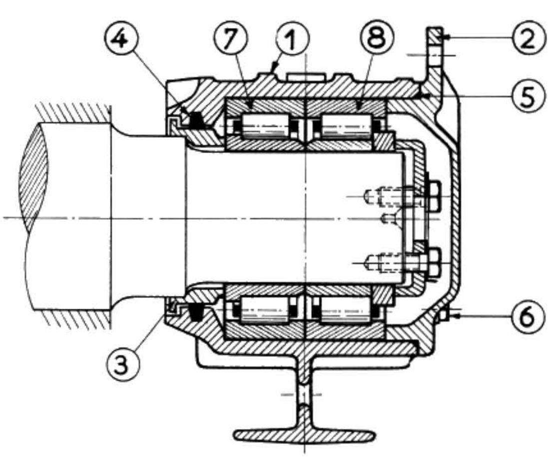


Fig. VI-16 — Boîte d'essieu pour bogies

1. Corps de boîte
2. Couvercle avant
3. Entretoise arrière
4. Obturateur
5. Joint torique
6. Vis et rondelle Grower
7. Roulement arrière
8. Roulement avant

Une boîte à rouleaux est essentiellement constituée:

— d'un corps de boîte;

— de roulements à rouleaux emmanchés avec serrage sur les fusées (un ou deux roulements suivant la charge supportée);

— d'un couvercle extérieur fixé par vis;

— d'une collerette d'étanchéité à chicanes prenant appui sur le collet de raccordement de la fusée à la portée de calage;

— d'un chapeau, placé en bout de fusée, qui exerce une pression par vis sur l'empilage des roulements sur la fusée dans le sens de la longueur.

Les corps de boîte sont en acier moulé ou en fonte suivant qu'elles sont destinées à des voitures ou à des wagons. La généralisation des boîtes à rouleaux sur le matériel roulant a constitué un grand progrès en ce sens qu'elle a réduit considérablement le nombre d'incidents pour chauffage (incident dû à l'échauffement des fusées par frottement). Elle a permis d'augmenter la vitesse des trains en respectant les normes de sécurité.

5. CONFORT

5.1. Définition de la notion de confort. — Le confort est l'ensemble des moyens qui déterminent le bien-être. Dans un train en marche il se traduit, pour le voyageur, par un ensemble de perceptions physiques, de sensations physiologiques agréables ou désagréables qui échappent souvent à l'analyse. Une méthode de détermination et d'appréciation de la qualité du confort des véhicules à bogies a été élaborée dans le cadre de l'Union internationale des chemins de fer. Elle définit scientifiquement le confort de roulement et de suspension des voitures à l'aide d'enregistrements réalisés dans des conditions de vitesse et de voie bien déterminées. Les investigations portent essentiellement sur les qualités du véhicule examiné ainsi que sur les causes excitatrices qui provoquent les mouvements du véhicule.

Les caractéristiques de la voie étant connues (écartement moyen réel, amplitude des irrégularités de nivellement, amplitude des irrégularités de tracé en alignement et en courbe), la vitesse étant définie, on procède à l'enregistrement continu suivant trois directions: verticale, transversale ou longitudinale, au moyen d'accéléromètres. Le véhicule sur lequel sont effectuées ces mesures est placé en queue du train de façon à ne pas être influencé par des sollicitations extérieures. Pour faciliter l'interprétation des résultats, on procède au préalable à un filtrage, entre le captage et l'enregistrement de façon à éliminer un certain nombre de mouvements parasites. Ce filtrage est fait à 5 Hz pour les mouvements verticaux et transversaux et à 15 Hz pour les vibrations verticales de caisse et les mouvements longitudinaux. Un filtrage à 7 Hz est utilisé lorsqu'il s'agit d'étudier les mouvements de tamis. Il convient de préciser que l'examen des enregistrements (fig. VI-17) porte essentiellement sur les variations d'amplitude des accélérations à allure oscillatoire. De plus, dans les mesures d'accélérations verticales, on ne tient pas compte de l'accélération due à la pesanteur. De même, pour les mesures d'accélérations transversales, l'accélération centrifuge non compensée en courbe est déduite car on considère que sa valeur n'est d'aucun intérêt pour la détermination du confort.

Il reste à définir les axes de référence à partir desquels seront mesurées les amplitudes. Pour les signaux à 5 Hz on prend généralement la ligne représentant l'accélération centrifuge résiduelle pour les mesures transversales en courbe et la ligne d'ordonnée zéro pour les mesures transversales en alignement droit. Pour les accélérations verticales, c'est la droite qui correspond à l'accélération terrestre g qui est prise comme origine. Dans le cas des signaux à 15 Hz, c'est la droite d'ordonnée nulle ou la courbe d'accélération de basse fréquence qui sert de référence.

L'interprétation des résultats conduit à repérer les pointes d'accélération et à les classer dans les intervalles d'amplitude multiples de $\frac{g}{30}$ en procédant à leur décompte. On obtient ainsi le résultat statistique suivant:

$$0 \text{ à } \frac{1}{30} : n_1$$

$$\frac{1}{30} \text{ à } \frac{2}{30} : n_2$$

$$\frac{2}{30} \text{ à } \frac{3}{30} : n_3, \ldots, \text{ etc.}$$

Cinq intervalles suffisent pour couvrir toutes les amplitudes d'accélérations rencontrées dans ce genre de mesures. Le nombre d'accélérations étant comptabilisé dans chaque tranche, il est facile de déduire les longueurs, L_1, L_2, L_3, parcourues dans chacune d'elles, puis de faire leur somme qui est égale à la longueur de référence (1 000 ou 2 000 m). La note de confort est égale à:

$$T = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{\frac{L_1}{T_1} + \frac{L_2}{T_2} + \frac{L_3}{T_3}} \cdots$$

Cette valeur est en fait le temps pendant lequel l'organisme humain peut supporter sans fatigue les accélérations auxquelles sont soumises un véhicule circulant à une vitesse déterminée. Les valeurs T_1, T_2, T_3 sont les durées de fatigue correspondant aux accélérations γ_1, γ_2, γ_3 enregistrées. Elles sont données au moyen de courbes d'égale fatigue préalablement établies (fig. VI-18) en supposant un véhicule soumis à des accélérations de fréquence 1,4 Hz. Un temps de 6 h correspond à un confort de qualité satisfaisante. Les plus récentes voitures de la S.N.C.F. ont une note de confort de 10 à 13 h.

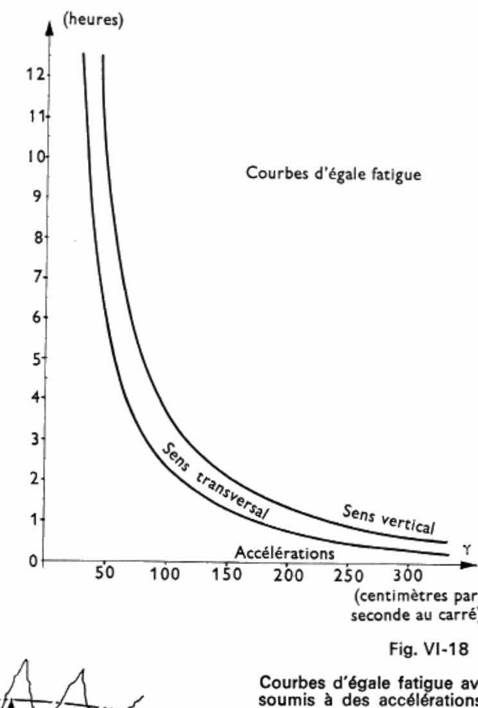
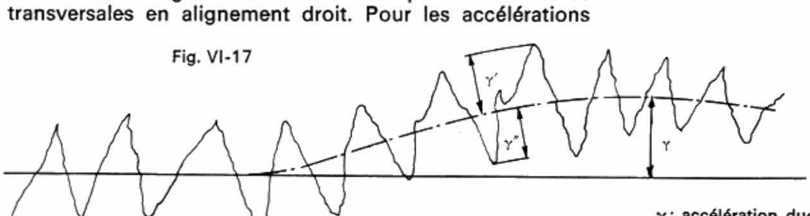


Fig. VI-18

Courbes d'égale fatigue avec un véhicule soumis à des accélérations de fréquence 1,4 Hz

Fig. VI-17



γ: accélération due à la force centrifuge dans une courbe
Les accélérations γ' γ'', etc., sont seules à intervenir dans le calcul de la note de confort

Fig. VI-19

Isolation acoustique et thermique (Voiture de grande ligne Y-UIC)

Pavillon :

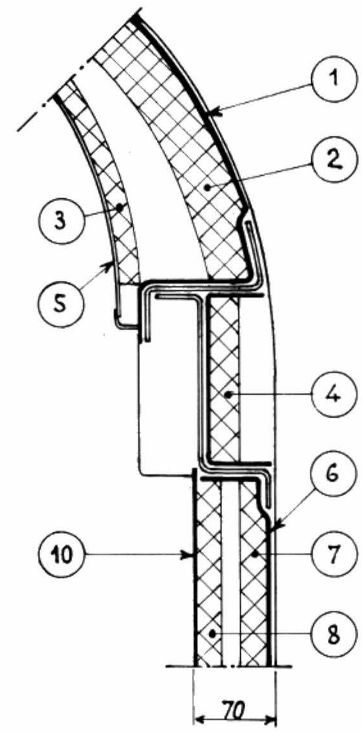
1. 2 couches de produit bitumeux antivibrant
2. Fibres minérales qualité superfine bakélisée - épaisseur 50 mm - densité 0,008. Courbes et longrines de pavillon enrobées de fibres minérales qualité superfine bakélisée, épaisseur 20 mm - densité 0,008
3. Fibres minérales qualité superfine bakélisée - épaisseur 20 mm - densité 0,008
4. Fibres minérales qualité superfine bakélisée - épaisseur 30 mm - densité 0,008. Revêtement du logement du réservoir exécuté en plaques de liège aggloméré, plus une couche de produit anti-corrosif.
5. Panneaux en Isoplast de 2,4 mm d'épaisseur.

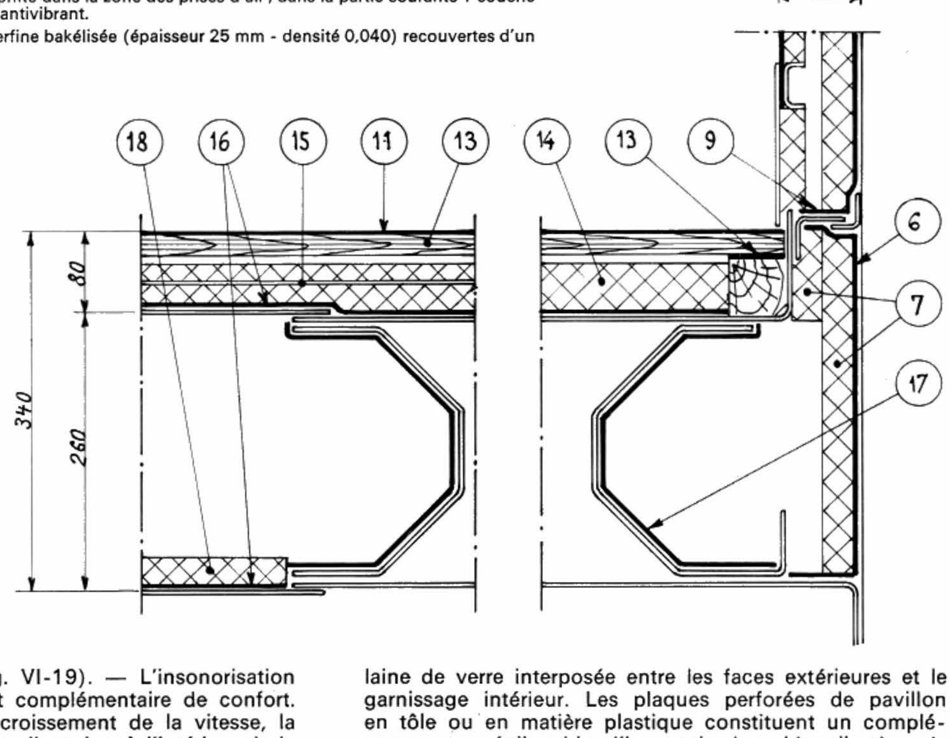
Face :

6. 2 couches de produit bitumeux antivibrant.
7. Fibres minérales qualité superfine bakélisée - épaisseur 30 mm - densité 0,008
8. Fibres minérales qualité superfine bakélisée - épaisseur 20 mm - densité 0,008
9. Couche épaisse de produit bitumeux anti-vibrant - épaisseur 10 mm environ.
10. Panneaux en plastique lamifié - épaisseur 3 mm.

Plancher :

11. Linoléum - épaisseur 4 mm (voitures de 2[e] classe)
    Linoléum - épaisseur 2 mm (recouvert d'une moquette) épaisseur 6 mm (voitures 1[re] classe).
12. Plancher en contreplaqué.
13. Feutre asphalté - épaisseur 4 mm.
14. Fibres minérales qualité superfine bakélisée - épaisseur 50 mm - densité 0,040.
15. Tôle d'acier de 1,2 mm d'épaisseur au-dessus des bogies et sur la longueur de deux compartiments à chaque extrémité.
16. 2 couches de produit bitumeux antivibrant.
17. 2 couches de peinture au graphite dans la zone des prises d'air ; dans la partie courante 1 couche épaisse de produit bitumeux antivibrant.
18. Fibres minérales qualité superfine bakélisée (épaisseur 25 mm - densité 0,040) recouvertes d'un film en matière plastique.





5.2. Insonorisation (fig. VI-19). — L'insonorisation des voitures est un élément complémentaire de confort. Au fur et à mesure de l'accroissement de la vitesse, la propagation des phénomènes vibratoires à l'intérieur de la caisse a fait apparaître des problèmes qu'il a fallu résoudre en effectuant de nombreux essais et recherches. Ils ont abouti à la mise au point de techniques particulières au niveau du bogie, du plancher et de la caisse.

L'utilisation du caoutchouc synthétique et de bagues isolantes dans les articulations et les surfaces d'appui des ressorts des bogies, par exemple, a permis de filtrer un certain nombre de vibrations. Entre le bogie et la caisse, le plancher de large épaisseur constitué par divers matériaux réfléchissants et absorbants, fait office d'écran efficace. À l'intérieur de la voiture, les produits insonorisants à base de caoutchouc et d'amiante, appliqués sous forme liquide sur les faces internes, réduisent sensiblement le niveau sonore. Il faut ajouter à cet échantillonnage, la laine de verre interposée entre les faces extérieures et le garnissage intérieur. Les plaques perforées de pavillon en tôle ou en matière plastique constituent un complément non négligeable d'insonorisation. L'application de moquettes et l'utilisation de tissus dans les voitures modernes de première classe ont encore diminué sensiblement le niveau sonore à l'intérieur des voitures. On est ainsi parvenu à un haut degré d'insonorisation dont l'indice d'intelligibilité de la parole, considéré comme critère valable, atteint 98 % dans le compartiment milieu des voitures T.E.E. les plus récentes dont les baies sont à double parois de verre. Il est bon d'indiquer que la généralisation des barres longues (rails soudés sur une grande longueur) sur les lignes de grand trafic apporte une amélioration importante de la qualité de confort. Des mesures de bruit réalisées dans des voitures de prestige, sur des lignes équipées de barres longues, ont permis d'enregistrer un niveau sonore assez bas, ne dépassant pas 56 dB (V. t. 2, Électroacoustique, chap. 1).

5.3. Chauffage

5.3.1. Généralités. — La nécessité de chauffer les voitures s'est imposée dès la création des premiers services de transports « voyageurs ». À l'origine on étendit l'usage des bouillottes domestiques déjà utilisées pour le chauffage des voyageurs dans les diligences. Elles étaient fournies par l'administration et remplacées à chaque arrêt car leur efficacité n'excédait pas deux heures. Bien entendu, il n'était pas question de chauffer le volume des compartiments par ce moyen rudimentaire.

Il faut attendre le début du XXe siècle pour voir apparaître sur les voitures un véritable système de chauffage central; il s'agissait d'une chaudière à eau alimentant par thermosiphon des chaufferettes placées dans le plancher, dans le sens longitudinal du compartiment. Au chauffage à eau chaude par thermosiphon a succédé le chauffage par vapeur détendue fournie par la locomotive à des radiateurs disposés sous les sièges. Ce dernier système a été progressivement perfectionné; il subsiste encore de nos jours sur du matériel ancien. Avec l'électrification, les voitures ont été équipées de radiateurs électriques, d'abord à réglage manuel, puis à régulation automatique par thermostat. Pendant longtemps, les deux systèmes, vapeur et électrique, ont coexisté sur les voitures. Puis apparut vers 1935 le chauffage par air pulsé alimenté par un système mixte vapeur-électricité. Il équipait des voitures O.C.E.M. à faces lisses et les voitures « allégées » des chemins de fer de l'État qui étaient de plus, pour ces dernières, munies d'un système de réfrigération par glace industrielle.

C'est ce type de chauffage, sous une forme plus évoluée, qui prévaut à l'heure actuelle sous la dénomination de chauffage à air pulsé à température modulée. Pendant longtemps on a utilisé pour ce mode de chauffage deux sources de chaleur (vapeur et électricité) permettant d'incorporer les voitures dans des trains remorqués en traction vapeur ou en traction électrique. Cette double alimentation fonctionne également en traction Diesel soit par l'intermédiaire d'un fourgon chaudière lorsque la puissance de l'engin de traction est insuffisante soit par chauffage électrique quand il s'agit d'une locomotive Diesel de forte puissance. Sous sa forme actuelle il constitue un élément important du confort.

5.3.2. Types de chauffage

1° *Le chauffage par convection* qui utilise des radiateurs placés généralement sous les sièges et le long du couloir latéral dans les voitures à compartiments. Il utilise différentes sources de chaleur :

— vapeur en traction à vapeur et Diesel;

— eau chaude dans des cas bien particuliers (voitures-lits, voitures-restaurant, par exemple);

— électricité sur les lignes électrifiées et avec les diesels de forte puissance.

Sur les voitures équipées de ce type de chauffage, le renouvellement de l'air vicié est assuré par des aérateurs statiques placés dans le pavillon.

2° *Le chauffage par air pulsé* à température modulée et à régulation automatique (fig. VI-20 et VI-21). — Le réchauffeur est constitué par une batterie de chauffe alimentée en vapeur ou en haute tension (1 000 V-16 $\frac{2}{3}$ Hz, 1 000 V-50 Hz, 1 500 V continu, 1 500 V-50 Hz, 3 000 V continu). L'air est aspiré à l'extérieur et envoyé au travers de la batterie de chauffe par un ventilateur, avant d'être pulsé à l'intérieur des compartiments par l'intermédiaire d'un réseau de gaines calorifugées comportant à leurs extrémités des diffuseurs réglables disposés le long des sièges. En marche normale une certaine partie du volume d'air recyclé après filtrage est rejetée à l'extérieur ($\frac{1}{3}$ environ du débit horaire). Il existe diverses variantes de ce système, notamment celui qui utilise un échangeur de chaleur à brûleur fonctionnant au P.S.P. (pétrole sans paraffine). Ce système a l'avantage de rendre les voitures autonomes quel que soit le mode de traction. Il est cependant peu probable que son emploi soit appelé à un grand avenir.

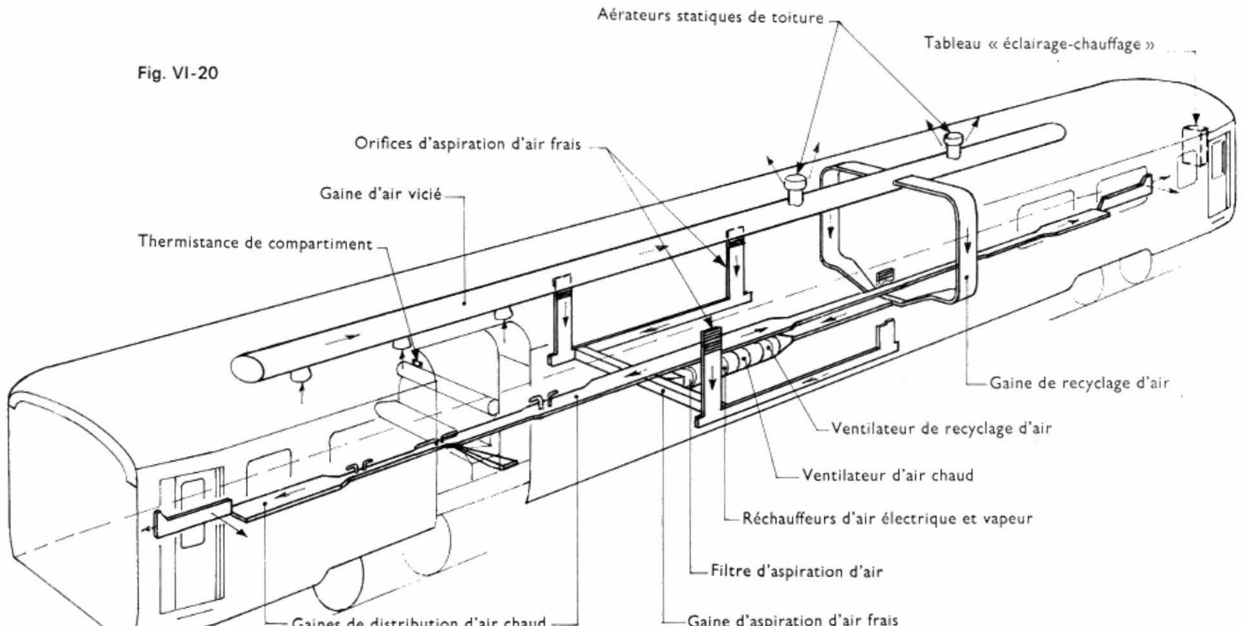
La puissance dissipée dans une telle installation est de 40 kW ce qui correspond à environ 35 000 calories par heure évacuées par un débit horaire de 1 600 m^3 d'air (à zéro degré Celsius), ce qui représente à peu près une consommation de 20 m^3 par personne et par heure.

Mais en raison des qualités techniques et d'hygiène qu'il présente, ajoutées à sa grande souplesse de fonctionnement, le chauffage à air pulsé modulé tend à se généraliser en Europe.

5.3.3. Conditions de températures intérieures imposées par l'U.I.C.

Température extérieure en degrés Celsius	Degré hygrométrique extérieur	Conditions intérieures		
		Température	Degré hygrométrique minimal	Degré hygrométrique maximal
— 18 à + 20		+ 22	35 %	70 %
+ 25	94 %	+ 23	35 %	65 %
+ 30	70 %	+ 26	35 %	60 %
+ 32	58 %	+ 26	35 %	60 %

Fig. VI-20



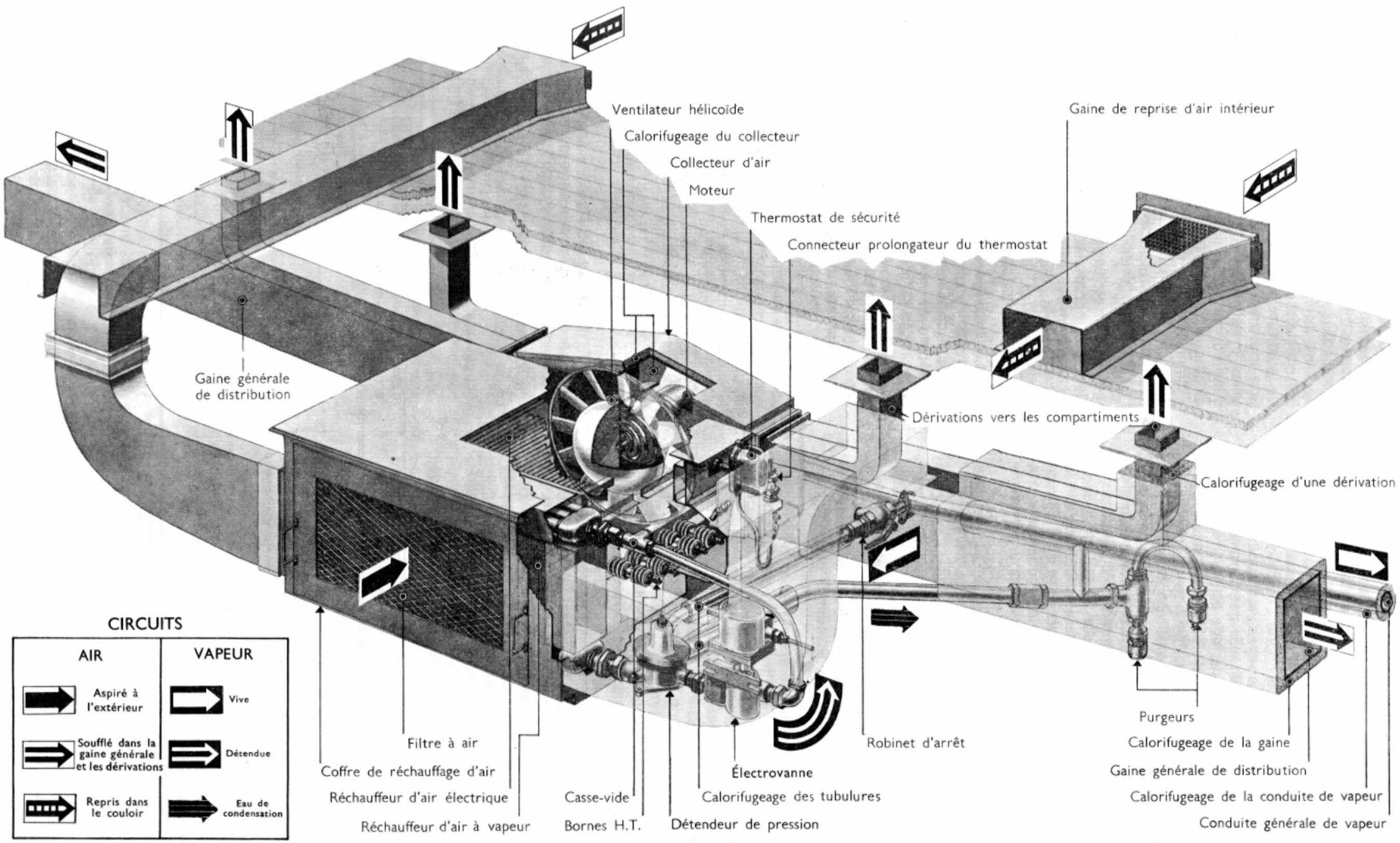


Fig. VI-21 — Ensemble du groupe réchauffeur d'air (vapeur et électricité) de l'équipement de chauffage à soufflage continu et à température modulée monté sur les voitures de la S.N.C.F.

À partir de ces données, des études très poussées ont été entreprises pour analyser le mécanisme complexe des échanges thermiques dans les conditions d'utilisation et de circulation d'une voiture. Le problème des déperditions a fait l'objet d'études particulièrement approfondies dans le but d'améliorer le rendement des installations. On peut penser que, sur ce point précis, des progrès importants seront réalisés ; ils auront pour effet de réduire sensiblement le coût de la consommation de courant électrique. À titre indicatif, la dépense d'énergie en chauffage électrique pendant une campagne d'hiver établie par comparaison de la consommation de courant en période estivale représente approximativement pour la S.N.C.F. la somme considérable de dix millions de francs base 1968.

Des économies substantielles ont été réalisées avec l'application de la régulation automatique de température. Celle-ci est obtenue par un régulateur, de réalisation électronique, qui permet de tenir compte de la température extérieure (une sonde est placée sur la toiture), de la température de l'air soufflé dans la gaine principale, de la température à l'intérieur des compartiments (à l'aide de thermistances). Les informations ainsi recueillies sont envoyées sur un pont de Wheatstone utilisé pour commander les relais de fonctionnement du chauffage.

Les travaux de recherches sont effectués à la station d'essais de Vienne (Autriche) pour le compte des administrations membres de l'U.I.C.

5.4. Le conditionnement d'air

5.4.1. Généralités. — Le conditionnement d'air s'est imposé sur les voitures de prestige dont la qualité du confort général a été particulièrement soignée pour satisfaire une clientèle exigeante habituée bien souvent aux voyages par avion.

Le conditionnement d'air comprend (fig. VI-22) : le chauffage, la réfrigération, le filtrage de l'air, le maintien d'un état hygrométrique de l'air dans les limites établies, le renouvellement de l'air et la régulation. Toutes ces fonctions sont automatiques et soustraites à l'intervention du voyageur. La « climatisation » n'est possible que pour des véhicules dont l'isolation thermique est aussi parfaite que possible de façon à limiter les pertes par manque d'étanchéité. C'est pourquoi, sur les voitures munies du conditionnement d'air, les baies sont fixes et en général à double paroi.

La production d'énergie est d'origine électrique ; elle peut être à caractère collectif (pour l'ensemble du train) ou séparé (sur chacune des voitures composant la formation). Dans le premier cas, c'est un groupe Diesel-génératrice, placé dans un fourgon et associé ou non à une batterie d'accumulateurs, qui fournit l'énergie pour l'ensemble du train. La puissance est déterminée en fonction de la composition maximale de la rame. C'est en général une alimentation triphasée 660 V ; les voitures sont reliées par une ligne de train. Il existe des variantes de cette conception où la génératrice est associée à une batterie et entraînée par les essieux. De récents progrès permettent également d'utiliser un groupe convertisseur alimenté par la caténaire. La distribution est faite dans les mêmes conditions que précédemment. La solution individuelle par voiture utilise le courant de la caténaire qui est transformé en courant industriel par un groupe convertisseur placé dans une partie de la voiture bien refroidie. C'est en général une alimentation triphasée 380/220 V-50 Hz qui est choisie pour de telles installations. Dans les applications ferroviaires, le conditionnement d'air est souvent associé à un chauffage électrique de base par radiateur. C'est le cas des voitures « climatisées » de la S.N.C.F. La puissance mise en œuvre dans une telle installation se répartit comme suit : 17 kW pour les radiateurs de plancher, 16 kW pour le réchauffage de l'air, 21 000 frigories-heure pour le système de réfrigération.

5.4.2. Chauffage. — L'air est chauffé par une batterie électrique incorporée dans l'unité de conditionnement d'air. Le soufflage est réalisé en partie haute par des ventilateurs qui aspirent un mélange d'air extérieur filtré et d'air recyclé. En partie basse, le réchauffage de l'air ambiant est réalisé par des radiateurs placés sous les sièges.

5.4.3. Réfrigération. — Une installation de réfrigération comprend les organes principaux suivants : un compresseur, un condenseur, un réservoir de liquide frigorigène, un détendeur, une unité de conditionnement. Le compresseur pompe le liquide frigorigène qui se trouve à l'état de vapeur dans l'évaporateur et le comprime ; la température du gaz augmente. Cette vapeur ainsi comprimée est refoulée dans un condenseur où elle cède sa chaleur à l'air ambiant beaucoup moins chaud, soufflé à travers les serpentins. La vapeur, toujours sous la même pression mais refroidie par circulation de l'air, se condense pour être recueillie sous forme de liquide dans le réservoir. Ce liquide s'écoule ensuite à travers un filtre jusqu'au détendeur et c'est seulement la quantité de liquide correspondant aux besoins qui atteint les serpentins de l'évaporateur. Ce dosage à la sortie de l'orifice calibré du détendeur provoque une chute de pression et une baisse de température. L'air en circulant à travers les serpentins à ailettes de l'évaporateur abandonne une partie de sa chaleur au fluide qui se vaporise à nouveau. (V. t. 2, Applications électrodomestiques de l'électricité et de l'électronique, chap. 4).

5.4.4. Filtrage de l'air. — Le filtrage de l'air est fait à deux niveaux : à l'entrée dans la voiture (air neuf) et avant le passage de l'air recyclé dans l'unité de conditionnement.

5.4.5. Maintien de l'état hygrométrique de l'air. — Le maintien de l'état hygrométrique de l'air dans les condi-

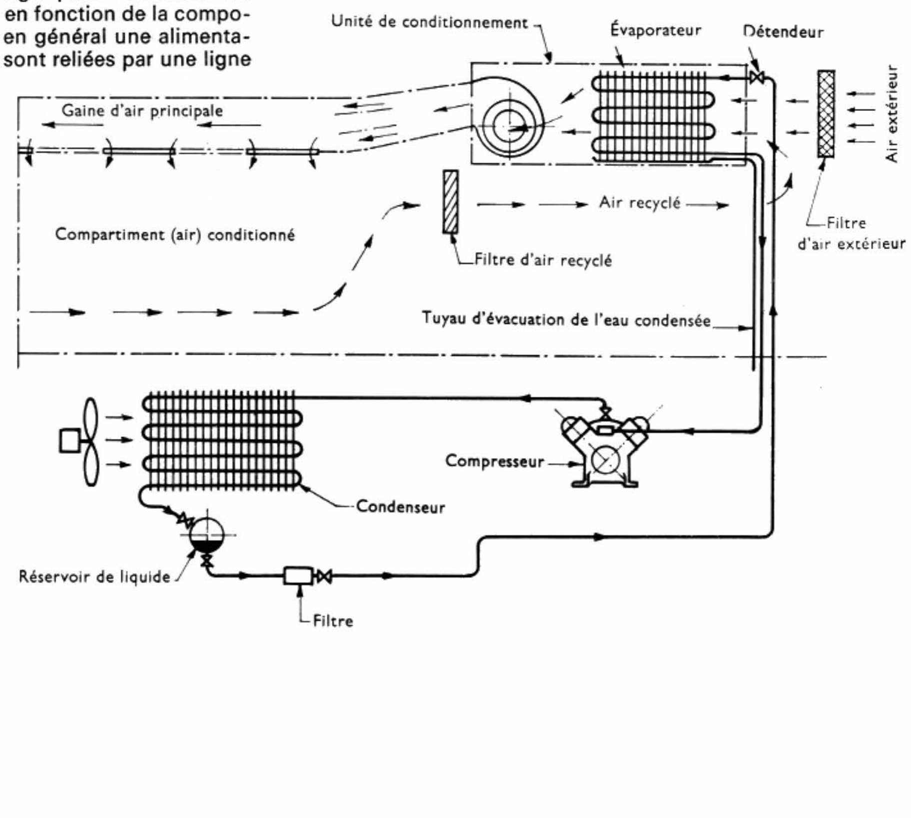


Fig. VI-22

Conditionnement d'air : schéma

tions imposées est obtenu en faisant passer l'air sur l'évaporateur compris dans l'unité de conditionnement. En léchant les ailettes du serpentin, l'air se trouve en contact intime avec une grande surface métallique dont la température est inférieure à celle du point de rosée (degré hygrométrique 100 %). Une certaine quantité d'eau contenue dans l'air refroidi, provenant en grande partie de la vapeur d'eau émise par les voyageurs, se trouve donc fixée par condensation. Elle est recueillie dans un bac de réception et évacuée à l'extérieur.

5.4.6. Renouvellement de l'air. — Il est obtenu par l'intermédiaire de ventilateurs centrifuges placés dans l'unité de conditionnement. La quantité d'air soufflé varie entre 2 000 et 3 500 m^3 par heure suivant les types d'installations et le volume à conditionner. L'air extérieur est aspiré puis mélangé avec une partie de l'air recyclé dans la proportion suivante : un tiers d'air frais et deux tiers d'air recyclé. Ce rapport est variable étant soumis aux impulsions de la régulation.

5.4.7. Régulation. — La régulation a pour but de maintenir la température constante à l'intérieur de la voiture (22 °C). Sur certaines installations peu perfectionnées cette température peut atteindre jusqu'à 28 °C en été (si la température extérieure ne dépasse pas 40 °C).

La régulation contrôle le fonctionnement du chauffage (le passage « du chaud au froid » et inversement), ainsi que la proportion d'air renouvelé. Elle est, en général, du type thermostatique avec un régulateur analogue à celui utilisé pour le chauffage par air pulsé modulé. Le conditionnement d'air est appelé à s'étendre sur le matériel de chemin de fer en raison du confort qu'il procure surtout pendant les périodes chaudes de l'été où il est particulièrement apprécié par la clientèle.

5.5. Éclairage des voitures

5.5.1. Généralités. — Les premières voitures de chemin de fer furent éclairées au moyen de lampes à huile. L'éclairage au gaz qui succéda fut abandonné peu après la première guerre mondiale à la suite de quelques accidents dramatiques, notamment l'incendie qui sévit dans le tunnel des Batignolles, à l'entrée de Paris, en février 1921 et qui fit de nombreuses victimes. À partir de cette époque, l'éclairage électrique, qui avait fait son apparition à l'occasion de l'exposition de 1900 sur une petite série de voitures, fut généralisé rapidement sur le matériel voyageurs. L'utilisation du filament en spirale sous atmosphère gazeuse (argon, krypton) permettait d'obtenir un éclairement de 15 lumens par watt ce qui était un progrès considérable. À l'heure actuelle on atteint 50 lumens par watt avec la lampe à fluorescence dont la durée de vie est de 3 000 heures dans certains cas. Le niveau minimal d'éclairement imposé par l'U.I.C. est de 150 lux pour l'éclairage par fluorescence et de 120 lux pour l'éclairage par incandescence. Ces valeurs doivent être obtenues à 0,80 m du plancher à une distance de 0,60 m du dossier de siège. En fait, les exigences de l'U.I.C. sont largement dépassées sur les voitures de construction récente équipées de l'éclairage fluorescent puisque l'éclairement mesuré dans les conditions indiquées précédemment atteint 300 lux.

5.5.2. Équipement des voitures. — Il y a lieu de distinguer deux modes de production du courant suivant que l'installation est autonome ou collective.

Dans le premier cas, le montage classique comprend :

— Une dynamo ou un alternateur entraîné par un essieu au moyen d'une courroie, le plus souvent trapézoïdale à plusieurs brins, ou par une transmission mécanique en bout d'axe de l'essieu. Cette dernière disposition est très répandue à l'étranger. On utilise surtout des alternateurs qui ont l'avantage de ne comporter ni collecteur ni balais. Le courant est redressé par des semiconducteurs au silicium. La puissance de telles machines peut atteindre 8 kW sous 72 volts sur certaines installations.

— Une batterie d'accumulateurs, rechargée pendant la marche au moyen de la génératrice, et qui alimente simultanément, à partir d'une certaine vitesse, l'éclairage et les auxiliaires de la voiture. Sa capacité est comprise entre 150 et 275 ampères-heures sous une tension de 24 ou 72 V. Cette dernière valeur tendant à se généraliser en raison de l'augmentation des puissances demandées.

— Un régulateur dont la fonction est de maintenir la tension constante à la sortie de la génératrice quelle que soit sa vitesse de rotation.

— Un conjoncteur-disjoncteur qui assure automatiquement le passage de l'alimentation de la génératrice à la batterie et inversement.

Dans les équipements par éclairage collectif, l'alimentation est assurée par des groupes Diesel-génératrice de puissance appropriée placés dans un fourgon spécialement aménagé. C'est le cas des voitures T.E.E. de la S.N.C.F. L'alimentation peut être assurée également par la locomotive au moyen de convertisseur, dynamo ou transformateur. Dans ce cas, les voitures doivent comporter une batterie d'accumulateurs pour l'éclairage en l'absence de la locomotive. Il convient d'ajouter que les installations modernes assurent en même temps l'alimentation des réchauffeurs d'eau de toilette ainsi que celle des prises électriques pour rasoirs. L'électronique trouve, bien entendu, une application de plus en plus poussée dans l'équipement électrique des voitures.

6. VÉHICULES APTES À CIRCULER SUR PLUSIEURS ÉCARTEMENTS DE VOIE

6.1. Généralités. — L'écartement de 1,435 m, en alignement droit, est le plus répandu dans le monde ; il est en usage dans la majorité des pays européens.

Quelques-uns cependant, l'U.R.S.S., l'Espagne, le Portugal, obéissant le plus souvent à des impératifs de stratégie militaire, ont opté pour des écartements de voies différents. C'est ainsi que la largeur des voies est de 1,668 m en Espagne, 1,665 m au Portugal, 1,600 m en Irlande, 1,524 m en U.R.S.S. et en Finlande.

Cette situation constitue une entrave importante pour le développement des échanges internationaux.

Si le transbordement peut être admis à la rigueur malgré le désagrément qu'il cause aux voyageurs, il n'en est pas de même pour le transport des marchandises en raison du coût qu'il représente.

6.2. Solutions adoptées

6.2.1. Changement d'essieux ou de bogies au point de rencontre des lignes. — Cette disposition fonctionne depuis un certain temps déjà pour des wagons à essieux qui assurent un trafic de primeurs et d'agrumes entre l'Espagne et le reste de l'Europe. Les chantiers sont installés à Hendaye et à Cerbère où les opérations de changement sont réalisées dans des conditions de sécurité et de rapidité satisfaisantes. Depuis le service d'été 1969, une relation « voyageurs » sans transbordement à la frontière a été inaugurée entre la France et l'Espagne par la mise en circulation d'un train composé de voitures-lits équipées de bogies interchangeables. Le nouveau chantier qui a été mis en service à cette occasion permet de lever simultanément cinq voitures. L'opération de changement des bogies est très rapide. les systèmes de liaison mécanique, électrique et pneumatique ayant fait l'objet d'études particulières. Une installation semblable à celle de Hendaye est utilisée à Brest-Litovsk entre la Pologne et l'U.R.S.S. pour traiter les véhicules assurant le trafic entre ces deux pays et les voitures-lits en transit de la relation Paris-Moscou.

6.2.2. Essieu à écartement variable (V. fig. VI-23). — C'est la solution retenue pour le train « Le Catalan-Talgo » qui relie Barcelone à Genève. La rame passe à Port-Bou sur un appareil de transition (V. fig. VI-24) qui raccorde les voies française et espagnole. Cet appareil est constitué par deux rampes horizontales, formant un ensemble divergent ou convergent suivant le sens de la circulation, qui amènent les roues vers l'écartement désiré. Simultanément, la charge est reportée par des appuis latéraux sur un rail de glissement placé sur toute la longueur de l'installation. Les opérations de verrouillage et de déverrouillage sont exécutées en même temps par deux cames verticales.

L'essieu est formé d'un châssis de forme spéciale en acier moulé ; il peut recevoir à ses extrémités les roues qui sont calées sur un axe court pouvant se déplacer latéralement.

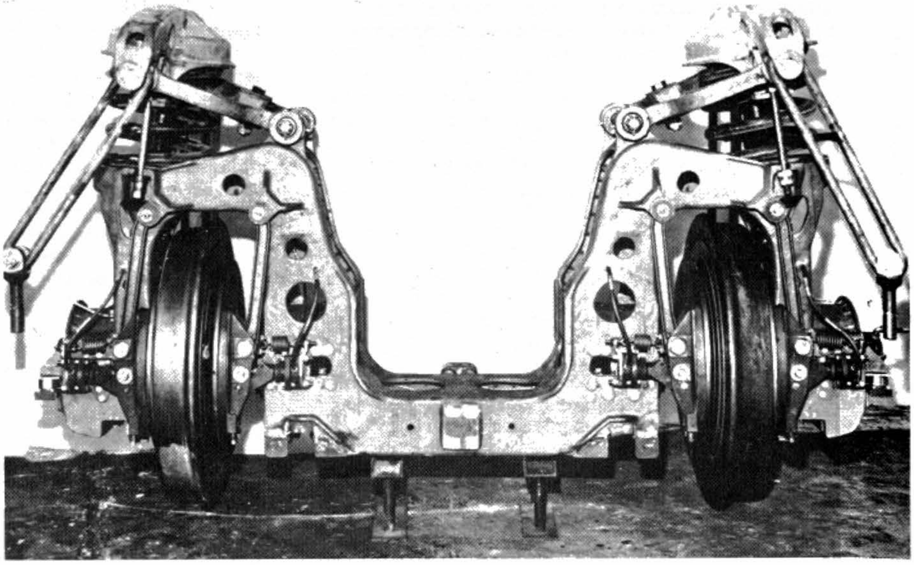
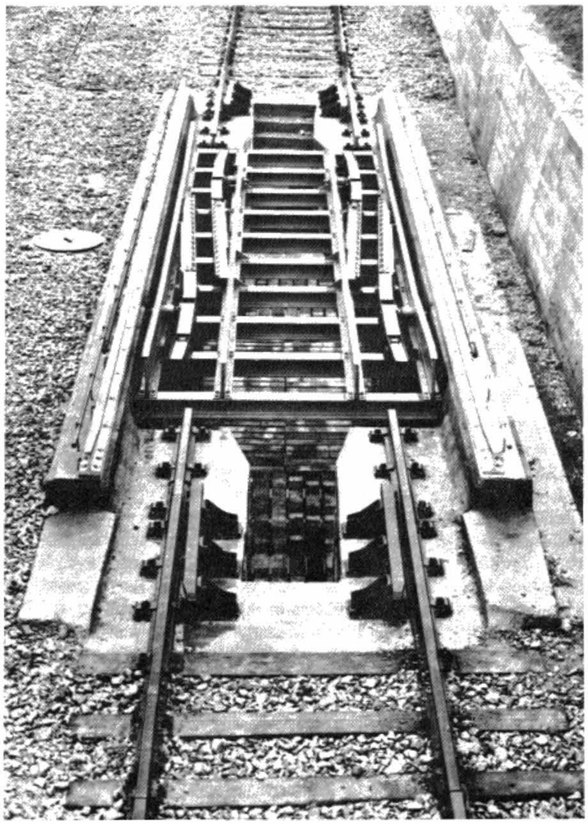


Fig. VI-23

Essieu à écartement variable (*Talgo*)

Fig. VI-24

Appareil de transition entre les voies française et espagnole (*Talgo*)



Celles-ci sont verrouillées dans chacune des positions correspondant aux deux écartements. Le châssis comporte un étage de suspension qui supporte la caisse à laquelle il est assujetti par un système de bielles d'asservissement. Le changement d'écartement se déroule à une vitesse comprise entre 5 et 10 km/h. Un système à écartement variable, où les roues se déplacent latéralement sur l'axe d'essieu, est en usage sur des véhicules affectés au trafic entre l'U.R.S.S. et la Pologne.

Il existe d'autres systèmes qui ont fait l'objet d'un concours organisé par l'U.I.C. mais dont le fonctionnement n'a pas encore été sanctionné par l'usage.

7. VOITURES SPÉCIALES

On désigne sous le nom de voitures spéciales des véhicules qui bénéficient d'aménagements appropriés à certains usages : couchage, service des repas, distractions, etc. imposés par la clientèle. On distingue dans cette catégorie :

— *Les voitures-lits.* — Leur aménagement comporte des cabines séparées dont certaines peuvent être jumelées par effacement d'une cloison escamotable ce qui permet différentes possibilités d'utilisation pour une à six personnes.

Ces voitures sont accompagnées par un agent qui assure toutes les formalités du voyage ainsi que le service du petit déjeuner à l'intérieur des voitures. Le plus souvent, elles sont équipées du chauffage central autonome par radiateurs à eau.

— *Les voitures-couchettes* (fig. VI-25, VI-26 et hors-texte). — Elles sont de plus en plus utilisées pour les voyages de nuit. Pour une redevance modique, elles permettent le repos allongé dans des conditions de confort satisfaisantes. Chaque compartiment est équipé de six couchettes en deuxième classe et de quatre en première classe.

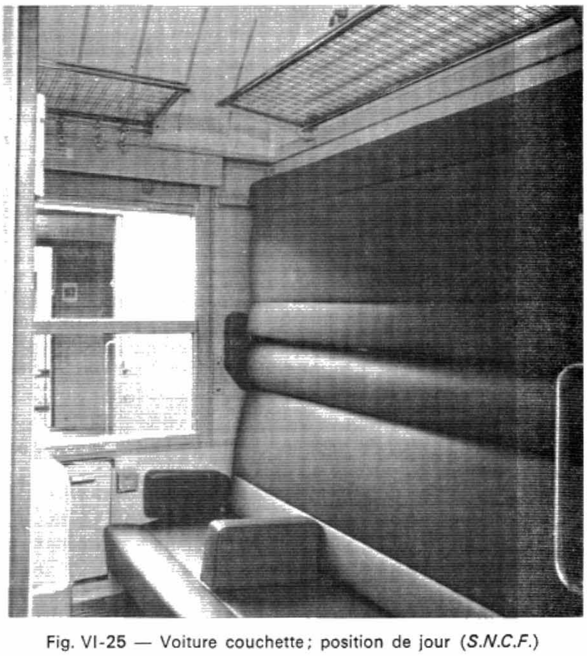


Fig. VI-25 — Voiture couchette ; position de jour (*S.N.C.F.*)

— *Les voitures-restaurant.* — Au cours de ces dernières années, elles ont bénéficié de perfectionnements nombreux et variés : cuisines modernes, lave-vaisselle, fours-grilloirs, etc. Sur les voitures récentes, l'alimentation en énergie est assurée par un groupe électrogène autonome. Elles comportent, en général, une grande salle de restaurant dont la décoration a été particulièrement soignée.

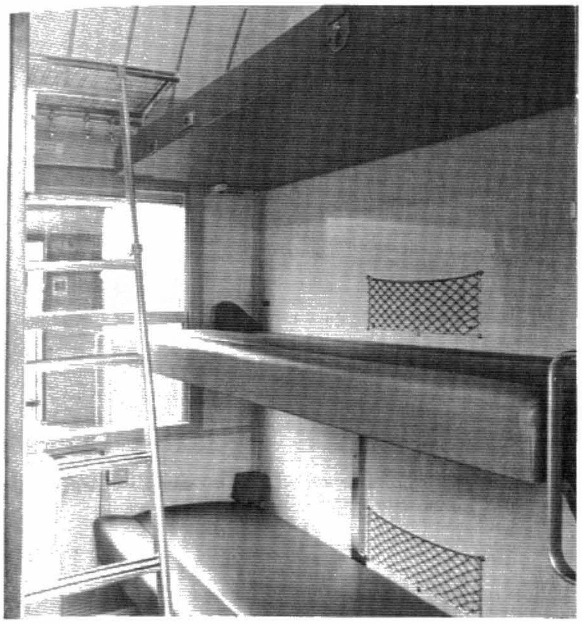


Fig. VI-26 — Voiture-couchette ; position de nuit (*S.N.C.F.*)

— *Les voitures gril-express* (fig. VI-27, VI-28 et hors-texte). — Elles offrent aux voyageurs le libre-service avec le choix des menus. C'est une formule nouvelle qui est appréciée sur un nombre croissant de relations intérieures.

— *Les voitures-bar.* — Elles sont également très répandues ; il en existe plusieurs versions dont la plus perfectionnée est celle en service dans quelques trains privilégiés : en plus du bar, elle comporte un magasin de vente de journaux et d'articles de bimbeloterie, un salon de coiffure et un local destiné au secrétariat des hommes d'affaires.

— *Les voitures sanitaires.* — Elles sont équipées spécialement pour le transport couché des grands malades accompagnés. La salle comporte plusieurs rangées de lits superposés dans le sens de la longueur du véhicule. Un local avec une petite installation de cuisine est prévu pour les soins en cours de route par un personnel spécialisé. Ces voitures sont équipées d'installations sanitaires appropriées. Elles sont également utilisées pour le transport des skieurs vers les stations de sport d'hiver. De plus, un certain nombre de voitures sont transformables pour assurer, en temps de guerre, les trains hôpitaux de l'Armée.

— *Les voitures-cinéma.* — Il en existe quelques exemplaires parfaitement équipés et insonorisés qui sont en général incorporés dans des trains d'agences touristiques ou d'affaires.

— *Les voitures postales.* — Elles sont aménagées pour le transport des lettres et colis. Les opérations de tri sont exécutées à bord pendant l'acheminement vers les lieux de destination. En France, elles sont la propriété des P.T.T. qui gèrent ainsi un parc important.

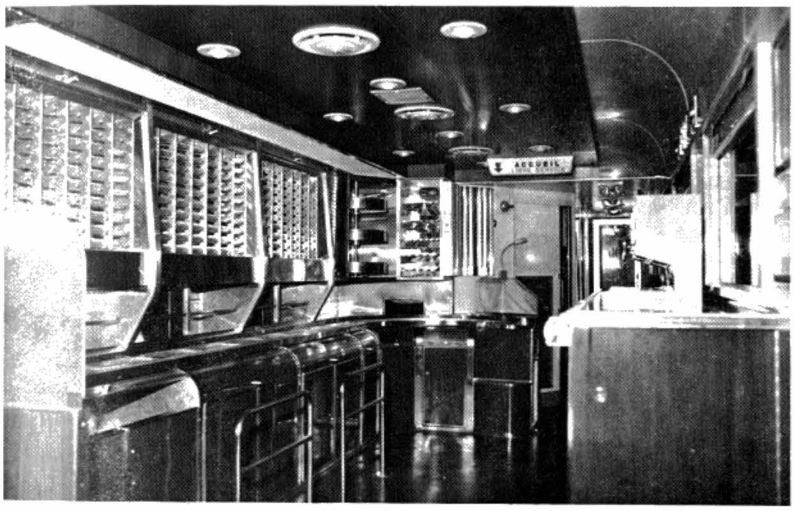


Fig. VI-27

Voiture gril-express ; intérieur de la partie réservée à la distribution (*S.N.C.F.*)

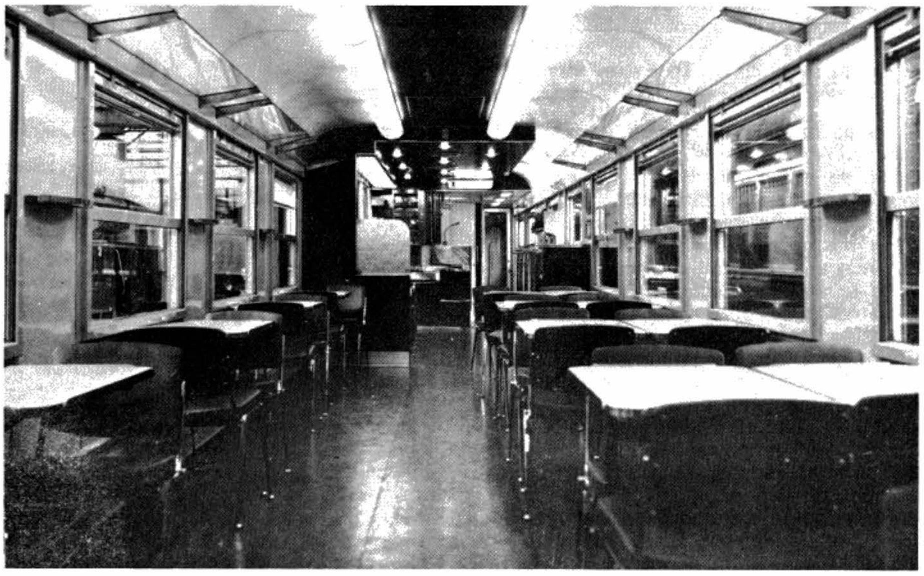


Fig. VI-28

Voiture gril-express ; salle de restaurant ; au fond la partie réservée à la distribution (*S.N.C.F.*)

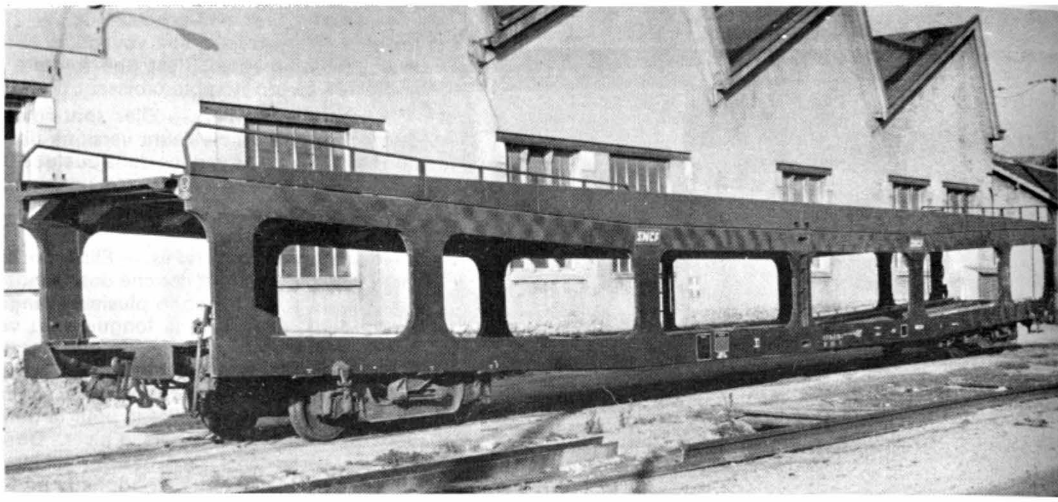


Fig. VI-29

Fourgon pour transport d'automobiles (*S.N.C.F.*)

— *Les voitures-dancing.* — En nombre très limité, elles sont incorporées dans certains trains réservés à des agences de voyages.

— *Les fourgons.* — Ils servent pour le transport d'automobiles (fig. VI-29) et permettent aux voyageurs de disposer de leur voiture à l'arrivée d'un parcours d'approche. C'est une formule qui est en pleine expansion et qui tend à se généraliser sur les grands axes ferroviaires. Ces véhicules comportent deux étages et peuvent transporter une dizaine de véhicules. Ils peuvent circuler à la vitesse de 150 km/h.

8. VOITURES À CAISSE INCLINABLE

Avec l'augmentation de la vitesse, qui atteint 200 km/h en service normal sur certains grands axes et qui sera dépassée dans un futur relativement proche, sont apparus des problèmes nouveaux concernant la circulation dans les courbes.

Tout véhicule se déplaçant dans une courbe de rayon R à la vitesse V est soumis à une accélération centrifuge égale à : $\gamma = \frac{V^2}{R}$. Elle doit être limitée à une valeur aussi réduite que possible en raison des efforts qui sont exercés sur la voie et de l'inconfort ressenti par les voyageurs. Pour diminuer l'effet de l'accélération centrifuge, on oppose une accélération centripète en inclinant le plan de roulement de la voie vers l'intérieur de la courbe. Cette inclinaison est obtenue par le surhaussement, appelé dévers, du rail extérieur de la voie. Le dévers a pour effet de décomposer l'accélération g de la pesanteur en une composante perpendiculaire au plan de roulement et une composante centripète γ' qui s'oppose à l'accélération centrifuge. En considérant la figure VI-30, si l'on désigne par d la valeur du dévers et par l la distance entre les rails, il est facile d'établir la relation suivante :

$$\frac{\gamma'}{g} = \frac{d}{l \cos \beta} \text{ qui entraîne : } \gamma' = \frac{g\,d}{l \cos \beta}$$

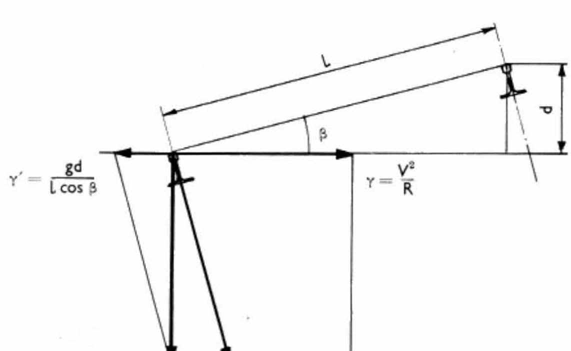


Fig. VI-30

On peut alors déduire la valeur de l'accélération centrifuge non compensée à la vitesse V :

$$\gamma'' = \frac{V^2}{R} - \frac{g\,d}{l \cos \beta} \qquad (1)$$

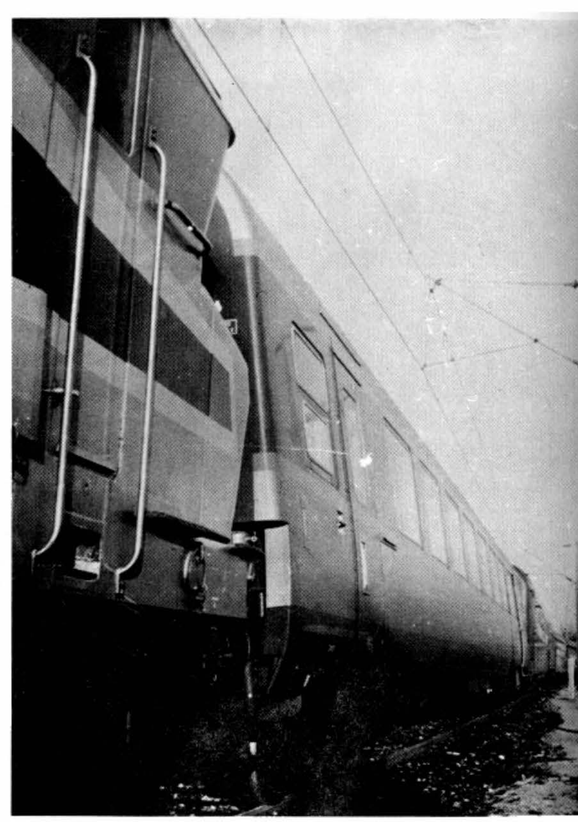
relation qui peut s'écrire sous la forme :

$$\gamma'' = \frac{g}{l}\left(\frac{V^2 l}{g R} - \frac{d}{\cos \beta}\right)$$

La quantité $\frac{V^2 l}{g R} - \frac{d}{\cos \beta}$ est appelée insuffisance de dévers I puisque c'est la valeur qui manque au dévers pour que l'accélération centrifuge soit exactement neutralisée.

Si l'on considère qu'en pratique l'angle β est compris entre 0 et 0,1 radian c'est-à-dire que sin β est inférieur à 0,1 la valeur de cos β peut se déduire de la relation suivante :

$$\cos^2 \beta = 1 - \left(\frac{1}{10}\right)^2 = \sqrt{0{,}999} \approx 1$$



Compensation d'insuffisance de dévers (*Cassy - La Vie du rail*)

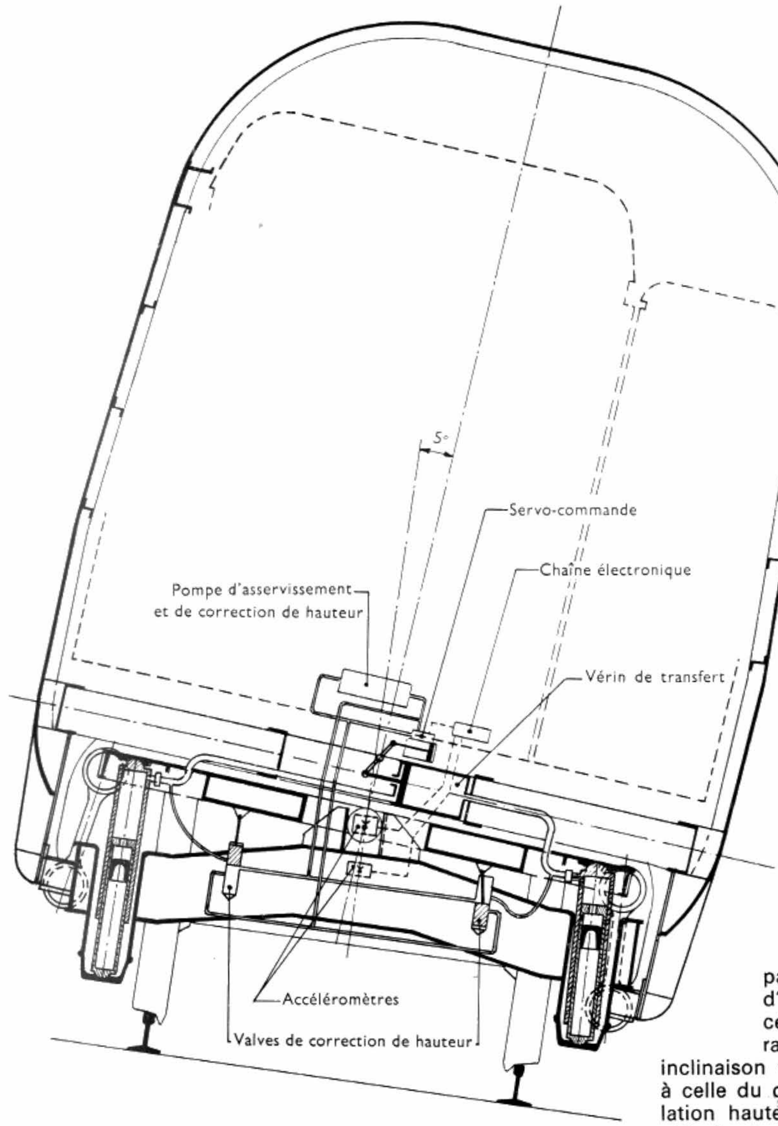


Fig. VI-31 — Compensation d'insuffisance de dévers

L'expression de l'insuffisance de dévers se ramène alors à l'expression :

$$I = \frac{V^2\, l}{g\, R} - d$$

et l'expression de l'accélération non compensée prend la forme :

$$\gamma'' = \frac{g}{l} \times I$$

Les administrations admettent que l'accélération γ'' soit comprise entre 0,65 m/s² et 1 m/s² suivant les pays ; ce dernier chiffre étant considéré comme un maximum par les règles U.I.C. À la S.N.C.F. on admet exceptionnellement 0,170 m d'insuffisance de dévers, ce qui correspond à une accélération non compensée légèrement inférieure à 1 m/s².

Il convient de préciser que l'effort limite admis par les services de la voie ne doit pas dépasser la valeur de $0{,}85 \left(1 + \frac{P}{3}\right)$ (*P* étant la charge transmise par l'essieu sur le rail) et que la limitation de vitesse imposée par le confort est inférieure à celle qui résulte de la fatigue de la voie. Au voisinage de cette limite et compte tenu que les trains de marchandises circulent à une vitesse moindre que celle des trains de voyageurs, il est nécessaire d'avoir recours à un système de correction autre que le dévers de la voie.

Des études ont été effectuées dans différents pays dans le but de limiter les effets de la force d'inertie centrifuge à grande vitesse sur les tracés de voie existants. La solution la plus couramment admise consiste à donner à la caisse une inclinaison vers l'intérieur des courbes qui vient s'ajouter à celle du dévers. Celle-ci peut être obtenue par pendulation haute de la caisse ou en exerçant au niveau du châssis et d'un seul côté du véhicule une action verticale dirigée de bas en haut.

Dans le système à pendulation haute le point d'articulation de la caisse sur les bogies est placé au-dessus de son centre de gravité ce qui permet l'inclinaison désirée sous l'effet des seules forces en présence. La réalisation de ce dispositif, assez séduisant a priori, implique néanmoins la construction d'une caisse avec châssis surbaissé dans laquelle les extrémités au droit des bogies ne peuvent être utilisées.

Au contraire, le second système s'accommode de la disposition classique dans laquelle les appuis de la caisse sur les bogies sont placés au-dessous de son centre de gravité. La suspension secondaire des bogies est remplacée par des vérins de suspension hydropneumatiques. Un système de détection mesure la valeur de la force d'inertie centrifuge avant l'entrée de la courbe, dans la zone de raccordement parabolique, et transmet l'information à un ensemble électronique qui commande le remplissage des cylindres de suspension d'un même côté des bogies. La traverse de charge s'incline par rapport au plan de la voie en entraînant la caisse dans son mouvement (fig. VI-31).

Avec cette technique appelée « compensation de l'insuffisance de dévers », dont la mise au point est en cours dans différents pays, on espère augmenter sensiblement la vitesse des trains sur des parcours sinueux sans qu'il en résulte un risque pour la voie et une gêne pour les voyageurs. Elle permet en outre d'utiliser les lignes existantes sans modification coûteuse autres que les améliorations de tracé dans les points singuliers.

9. GÉNÉRALITÉS

Les *marchandises* se présentent avec des *caractéristiques* et sous des *formes* les plus variées : produits ayant une certaine *résistance propre*, après avoir été, ou non, emballés ; produits *solides* en vrac, produits *liquides*, à la pression atmosphérique ou sous une pression supérieure, dangereux ou non ; produits *légers* ou *denses*, *longs* ou *courts*, *volumineux* ou non. La *quantité* à transporter peut être faible (l'unité, par exemple) ou importante, pour une même destination.

Elles réclament, ou non, certaines précautions, telles que : protection contre les *chocs* ou contre les *intempéries*, sécurité de l'*environnement* en cas d'incident, acheminement rapide imposé par leur *nature*, *constance de la température* pendant le transport, quelles que soient les températures régnant dans les zones traversées. Le *matériel* doit donc satisfaire à deux fonctions primordiales, qui sont : constituer l'*emballage*, éventuellement, et rendre solidaires le produit (ou son emballage) et l'engin de transport. En outre, il doit répondre à tous les autres impératifs déjà cités et assurer la *sécurité de la circulation*, en respectant, d'une part, la résistance de la voie et des ouvrages d'art, d'autre part, le *gabarit de chargement autorisé*, afin de permettre le libre passage dans les tunnels, sur les voies en tranchée, sous les « caténaires » et le long des installations fixes (gares, piles de pont, murs de soutènement).

En raison du grand nombre d'engins en service, ce qui représente un capital important, l'amortissement du matériel, en particulier celui des wagons, est peu rapide ; c'est ce qui explique la présence, dans le parc des réseaux ferroviaires, de wagons bien adaptés aux besoins du moment et de wagons anciens, moins économiquement utilisables. Mais quel que soit leur « âge », tous les wagons ont eu, depuis l'origine du chemin de fer, et conservent encore, un ensemble de caractères communs, les nouveaux dérivant des autres par une transformation lente mais continue, qui s'est particulièrement accentuée depuis 1960 ; ils restent simples dans leur conception générale, mais, au fur et à mesure de l'évolution des besoins et de la technique, des aménagements de plus en plus complexes leur sont appliqués et des appareillages nouveaux apparaissent.

Ainsi, il est possible de dire que le chemin de fer, aussi bien sur le plan national pour chaque réseau que sur le plan international, poursuit la même tâche, depuis le début du XXe siècle :

— permettre et même favoriser le développement, toujours plus important et plus rapide, de l'industrie et du commerce ;

— accompagner pas à pas cette évolution par une évolution parallèle de l'outil qu'il constitue, de façon à obtenir une meilleure utilisation et un meilleur rendement, cela pour le profit de tous (réseaux et clients).

10. ÉVOLUTION DES CONDITIONS IMPOSÉES POUR LE TRANSPORT DES MARCHANDISES

Les besoins et les techniques de construction ont varié.

10.1. Évolution des besoins. — Depuis 1945, les réseaux ont dû :

1° Augmenter les capacités en *charge* et en *volume* offertes par chaque véhicule.

2° Adopter des *aménagements* compatibles avec les *masses indivisibles* à transporter (de plus en plus importantes), avec le *conditionnement* (développement des emballages sous carton et de la palettisation) et avec l'extension du *stockage* des marchandises, *en vrac* ou sous forme *liquide*, en *silos* aériens ou en *fosses*, en *cuves* sur sol ou enterrées.

3° Rendre possible l'emploi, pour le chargement ou le déchargement, des moyens les plus modernes de *manutention mécanique* (chariots élévateurs à fourche, sauterelles et bandes transporteuses, ponts roulants et portiques de levage, grues fixes ou automobiles).

4° Réduire la *durée du transport*, en rendant le matériel apte à circuler à des vitesses toujours plus grandes et cela, malgré l'augmentation des charges unitaires.

5° Améliorer la *qualité du roulement* des wagons, sur la voie (réduction des vibrations, amortissement des efforts latéraux et verticaux) et éviter que des *efforts*, brusques ou progressifs, dus aux *chocs* et aux *réactions de freinage* ne s'exercent sur la marchandise ; de telles mesures conduisent heureusement à la réduction des risques d'avarie, aussi bien pour la marchandise que pour le matériel ou pour la voie.

6° Mieux protéger la marchandise contre les *intempéries* (pluie, humidité, neige), contre les *variations climatiques*, jugées néfastes pendant l'acheminement (changement important de la température, condensation, gel) et, par une bonne *aération* sans salissures, éviter l'*échauffement* naturel de certains produits.

7° Développer, sur le plan géographique et en densité, le système d'exploitation du transport dit « du porte-à-porte », qui supprime les *transbordements* des camions sur les wagons et, réciproquement, aux gares de départ et d'arrivée. Il en est résulté :

a) Une augmentation du nombre des *conteneurs* de tous types, transportables sur camions, wagons courants, et bateaux.

b) L'apparition, en quantité de plus en plus importante des *transconteneurs*, véritables caisses de wagons sans roulement, utilisables comme les conteneurs, mais qui demandent, pour assurer un service rapide et économique, des *wagons-porteurs spéciaux* et des *installations fixes particulières*, dans les ports et les nœuds ferroviaires importants.

c) La construction de nombreux wagons capables de transporter les *véhicules routiers*, vides ou chargés, qu'ils aient été, ou non, spécialement adaptés au *trafic mixte rail-route*.

10.2. Évolution des techniques de construction. — L'engin, affecté au transport des marchandises, était constitué à l'origine de poutres de bois et de barres de fer ou d'acier laminé, assemblées par des boulons ; il est devenu, peu à peu, *entièrement métallique*. Les éléments constitutifs, assemblés tout d'abord par rivetage, le sont maintenant presque uniquement par soudage (sauf les pièces d'usure interchangeables).

La nature même des matériaux utilisés a changé. L'*acier* d'élaboration Thomas (le moins cher) est de plus en plus remplacé par de l'acier élaboré suivant les différents procédés « à l'oxygène » ; l'acier courant E 24, facilement soudable, est souvent supplanté par l'acier E 36, dont la soudure demande quelques précautions, mais dont les caractéristiques mécaniques permettent, à résistance égale, d'obtenir un gain de poids non négligeable. Parfois, à l'acier au carbone non allié, est substitué un acier contenant certaines additions, afin d'en améliorer les qualités (addition de cuivre, par exemple, pour augmenter la résistance à la corrosion et à l'abrasion).

Le paragraphe 2.4 donne les caractéristiques des aciers au carbone, utilisés par les réseaux de chemin de fer.

Certaines nécessités ont conduit à l'emploi :

— de l'*aluminium* et ses *alliages* (recherche de l'allégement ou de la résistance à la corrosion) (V. § 2.6) ;

— de l'*acier inoxydable* au nickel-chrome (recherche de la résistance à la corrosion ou de certaines qualités imposées pour le transport des produits alimentaires) (V. § 2.5). ;

— des *matières plastiques* (recherche d'une bonne isolation, d'un bel aspect, d'une mise en forme facile par moulage, d'une certaine résistance aux chocs, d'une plus grande facilité de réparation, d'une bonne propreté, de la qualité « alimentaire », comme avec l'acier inoxydable, mais à un prix de revient assez nettement moins élevé).

Les procédés modernes de *traitements thermiques*, qui améliorent les fabrications et assurent une « durée de vie » plus longue, sont couramment utilisés (préchauffage des soudures de résistance, recuit de certains éléments constructifs pour éviter le risque de fissuration en service, trempe après chauffage haute ou moyenne fréquence des axes

d'articulation, durcissement des surfaces frottantes ou roulantes).

La *préparation des surfaces métalliques,* avant protection contre l'oxydation (grenaillage pour l'acier) est réalisée actuellement dans les conditions les meilleures et cela permet l'utilisation des *procédés de peinturage* les plus économiques et les plus efficaces (gain de temps et de matières, dans les usines réduction des surfaces couvertes chauffées nécessaires pour le séchage rapide, meilleure protection). Parmi ces améliorations on peut citer l'application au pistolet et l'emploi des peintures à séchage rapide, des peintures projetées à chaud et des peintures cuites au four ou sous lampes à infrarouges.

Cette évolution technique a conduit à une nette amélioration de la construction, sans augmentation abusive du coût; elle assure une bonne *constance de la qualité du service* et permet une *réduction sensible des frais d'entretien,* après la mise en service.

11. CLASSIFICATION DU MATÉRIEL À MARCHANDISES

On distingue trois grandes familles, chacune correspondant à un mode d'exploitation bien déterminé.

11.1. Première famille. — Elle comprend les *wagons* et se subdivise comme suit.

11.1.1. Wagons de types courants. — Ils sont conçus pour satisfaire les besoins les plus variés et permettent le transport de marchandises très diversifiées, soit par leur nature (légère ou pondéreuse), soit par leur présentation (encombrante ou d'un volume réduit, sous emballage ou en vrac); le chargement et le déchargement peuvent toujours être réalisés avec des moyens très rudimentaires. Le calage et la fixation sur le wagon n'exigent aucun aménagement particulier: on utilise soit des cordages, des chaînes, des fils de fer torsadés, soit des planches, des ablots, des cales, qui sont fixés sur le plancher par des clous ou des boulons.

Cette catégorie groupe les wagons appelés:
— wagons plats (fig. VI-32);
— wagons couverts (fig. VI-33);
— wagons tombereaux (fig. VI-34).

11.1.2. Wagons semi-spécialisés. — Prévus pour satisfaire des besoins très variés, ils ont cependant été adaptés:

a) Soit à une marchandise déterminée en raison de ses dimensions, de son poids, de sa nature (pièces de grande longueur ou volumineuses, pièces très lourdes, produits en vrac, etc.).

b) Soit à un ou plusieurs moyens modernes de

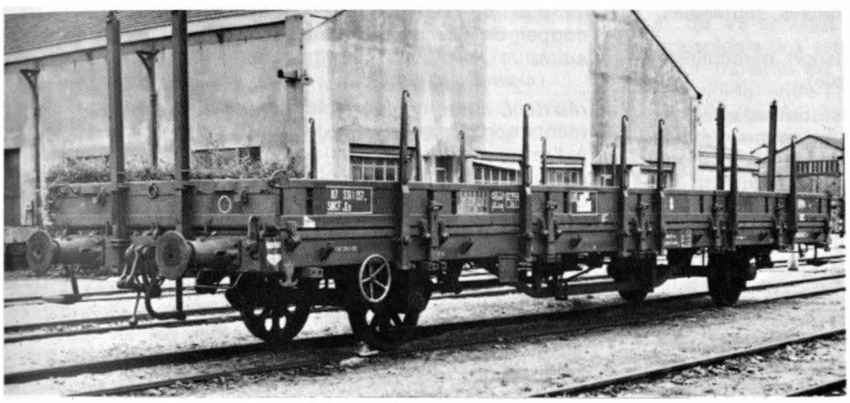


Fig. VI-32

Wagon plat à 2 essieux; plancher en bois, haussettes rabattables, ranchers latéraux pivotants, ranchers de bout amovibles
Longueur utile: 12,500 m
Surface utile: 35 m²
Tare: 12 500 kg
Régime de circulation: S (100 km/h)
(*S.N.C.F.*)



Fig. VI-33

Wagon couvert à 2 bogies à 2 essieux; plancher en bois, panneautage de caisse en bois contre-plaqué, toiture en tôle d'acier, une ouverture par face latérale (4 m × 2,150 m)
Longueur utile: 15,500 m
Surface utile: 40,50 m²
Volume utile: 102 m³
Tare: 22 000 kg
Régime de circulation: S (100 km/h)
(*S.N.C.F.*)

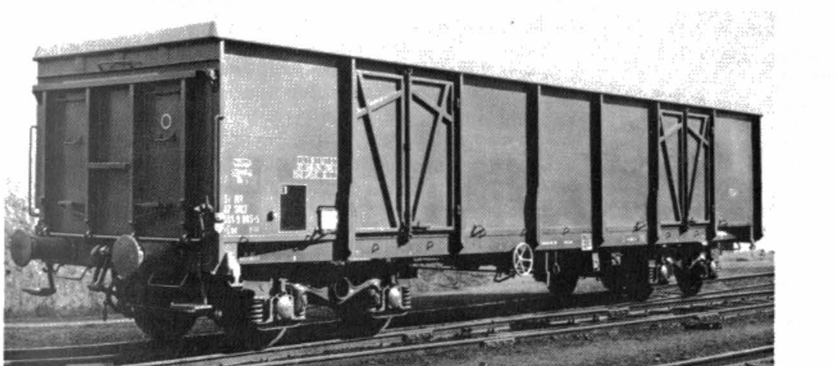


Fig. VI-34

Wagon tombereau à 2 bogies (à 2 essieux); plancher en bois, caisse métallique; 2 ouvertures par face latérale (1,800 m × 1,800 m); bouts ouvrants obturés par des panneaux oscillants (ouverture: 2,760 m × 1,610 m)
Longueur utile: 12,710 m
Surface utile: 36 m²
Volume utile: 72 m³
Tare: 22 000 kg
Régime de circulation: S (100 km/h)
(*S.N.C.F.*)



Fig. VI-35 — Grand conteneur de type courant, fermé, catégorie 72 ; plancher en bois, caisse métallique ; 1 ouverture sur une face latérale (1,800 m × 1,700 m) : volume utile : 13,800 m³ ; tare : 1 030 kg (*S.N.C.F.*)



Fig. VI-36 — Transconteneur ordinaire de type courant, fermé, de 6 m environ (20 pieds), catégorie 20/8 ; plancher en bois, caisse métallique, 1 ouverture par face latérale (1,700 m × 2 m), 1 ouverture sur un bout (2,300 m × 2,130 m) ; volume utile : 30 m³ ; tare : 2 150 kg (*S.N.C.F.*)

manutention (grues, ponts roulants, portiques, trémies de chargement aériennes, bandes transporteuses, sauterelles, chariots-élévateurs, etc.).

c) Soit à des conditions de transport particulières (sous température contrôlée, par exemple).

11.1.3. Wagons spécialisés. — Ils sont adaptés au transport d'un produit déterminé entre un centre d'expédition et un centre de destination dont les installations comportent les moyens nécessaires à la manutention du produit considéré ; c'est pourquoi, ils se présentent sous des formes, des dimensions, et avec des aménagements les plus divers.

11.2. Deuxième famille. — Elle comprend les *conteneurs* et les *transconteneurs*, emballages de formes et de dimensions très diverses, qui peuvent être manutentionnés à la main avec des moyens simples (les plus petits) ou qui nécessitent des moyens plus importants (en raison de leur poids, de leur encombrement), tels que chariots à fourche ou engins de levage du type grue ou portique. Cette famille se subdivise elle-même en trois catégories, chacune ayant comme définition, celle des wagons de même désignation. Exemples :

— *types courants :* grand conteneur (fig. VI-35) ou transconteneur de 6 m environ (20 pieds) (fig. VI-36) ;

— *types semi-spécialisés :* à toit ouvrant, isotherme, frigorifique, etc. ;

— *spécialisés :* à lait, à ciment, pour produits chimiques, etc.

11.3. Troisième famille. — Elle comprend tous les *engins routiers* spécialement adaptés au *trafic mixte « rail-route »* (V. ci-après, § 14.2).

Les véhicules routiers adaptés au transport par voie ferrée sont, au point de vue de la conception générale et de la construction, identiques aux véhicules routiers. Les modifications qui leur sont apportées pour assurer leur adaptation au rail portent essentiellement sur le train routier (pour le guidage sur le wagon porteur) et sur les dispositifs d'accrochage (béquilles pour les semi-remorques).

12. DIRECTIVES GÉNÉRALES POUR L'ÉTUDE ET LA CONSTRUCTION DU MATÉRIEL À MARCHANDISES

Il doit être robuste, d'un prix peu élevé, d'un entretien facile et répondre aux conditions internationales imposées pour la construction, la circulation et l'entretien.

12.1. Robustesse — Prix peu élevé — Entretien facile. — Ces conditions conduisent à deux solutions :

1° *Emploi de l'acier pris comme matière première,* sous ses *formes les plus courantes du commerce :* profilés, laminés ou pliés et tôles d'épaisseur comprise entre 1,5 et 12 mm, que les outillages modernes permettent de découper, de plier et d'assembler avec le minimum de difficulté.

2° *Réalisation, pour chaque engin, d'un ensemble résistant,* aussi indéformable que possible, constitué d'éléments non dissociables, à l'exception des pièces soumises à l'usure et de certaines parties rendues volontairement amovibles ou mobiles, pour assurer une fonction bien déterminée.

12.2. Conditions internationales pour la construction, la circulation et l'entretien. — Appelé à circuler partout où la géographie le permet, sans tenir compte des frontières nationales, le wagon est tributaire des conditions acceptées ou imposées par les différents pays intéressés.

1° *Cas général pour de nombreux états européens et certains pays d'Asie ou d'Afrique.* — Il existe des obligations résultant d'accords passés, soit entre les gouvernements, soit entre les réseaux de chemin de fer ; les principales figurent dans les documents désignés sous les noms de :

— *Unité technique,* qui définit en particulier, le gabarit à respecter et la largeur de la voie imposée ; c'est celle qui est d'ailleurs la plus répandue dans le monde : 1,435 m.

— *Code de l'union internationale des chemins de fer* (U.I.C.).

— *Règlement pour l'emploi réciproque des wagons en trafic international* (R.I.V.).

2° *Cas particulier pour certains réseaux.* — Des dispositions spéciales sont nécessaires lorsqu'il est fait usage d'un autre gabarit (comme les Chemins de fer britanniques) ou d'autres largeurs de voie (V. § 6) ; parfois, pour éviter les transbordements et permettre la continuité de la circulation, des aménagements installés au passage des frontières facilitent le changement des organes de roulement (essieux ou bogies) ; les wagons comportent naturellement des appareils de freinage compatibles avec les systèmes utilisés dans chacun des pays concernés.

3° *Qualités de service exigées.* — L'ensemble de ces conditions impose l'obligation de satisfaire à des qualités de service bien déterminées : mêmes caractéristiques commerciales, mêmes critères d'entretien (donc similitude de construction pour obtenir une même résistance en service). Pour cela le matériel est défini et construit dans des conditions qui sont fixées sur le plan international ; un organisme dépendant de l'U.I.C., l'Office de recherches et d'essais (O.R.E.) est chargé de donner toutes précisions sur la qualité des matériaux à employer, les collections de dessins de construction à utiliser, les normes imposées à la construction et à la réception et de définir les essais aux-

quels sont soumis les engins prototypes. De même, puisque l'entretien courant doit pouvoir être effectué partout où une avarie (ou risque d'avarie) est constatée, quel que soit le réseau propriétaire du matériel, les pièces d'usure doivent donc être interchangeables ; une unification poussée de ces pièces est imposée et toute création nouvelle est soumise à l'accord des Administrations ferroviaires, membres de l'U.I.C.

13. DIFFÉRENTES PARTIES CONSTITUTIVES DU MATÉRIEL À MARCHANDISES

Pour les définir et les étudier, il faut tenir compte du rôle qui est attribué à chacune des deux premières familles, celle des wagons et celle des conteneurs.

13.1. Rôle du wagon. — Son rôle principal est d'assurer la circulation organisée sur les rails, de l'ensemble qu'il forme avec le chargement, en prenant place dans un autre ensemble, constitué par le train ; il possède donc des *organes de roulement* et des *organes de liaison* avec les autres wagons.

13.2. Rôle du conteneur. — Il a pour rôle de constituer l'emballage de la marchandise et, grâce à l'utilisation de moyens extérieurs appropriés, de permettre à l'ensemble qu'il constitue avec elle d'être manutentionné, c'est-à-dire, soulevé, déplacé, posé sur le sol ou sur un engin qui assurera ensuite son transport, sur rails, sur route ou éventuellement, par voie d'eau (maritime ou fluviale).

14. PARTIES CONSTITUTIVES DU WAGON

Les dispositions adoptées, leur forme, leur emplacement, leur résistance, résultent, d'une part, de la fonction attribuée à chacune d'elles pour le type de wagon considéré (V. § 11.1) et, d'autre part, des sollicitations auxquelles il est soumis en service. Certains organes sont identiques et ont les mêmes fonctions que les organes correspondants du matériel à voyageurs ; leur rôle et leur description figurent au paragraphe 2.

Les principales sollicitations auxquelles un wagon est soumis lorsqu'il circule sur la voie proviennent (fig. VI-37) :

— du *déplacement normal* par traction ou par pousse, *suivant l'axe XX* (axe longitudinal, droit ou courbe, de la voie) ;

— du *galop*, mouvement de translation, *suivant l'axe ZZ*, résultant de l'abaissement et du soulèvement de la partie suspendue ; il est provoqué par les joints de rails, les inégalités de la voie, les appareils d'aiguillage, l'insuffisance de rigidité du wagon ;

— du *balancement*, mouvement de translation, *suivant l'axe YY*, dû aux jeux fonctionnels entre la roue appuyée au rail et les divers éléments qui la raccordent au wagon ;

— du *roulis*, mouvement de rotation *autour de l'axe XX* ;

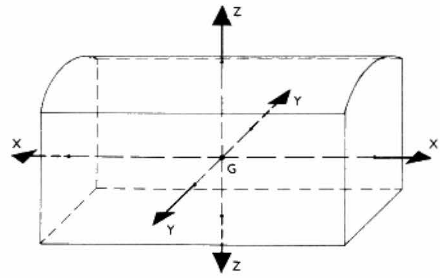


Fig. VI-37 — Axes de référence pour les sollicitations auxquelles sont soumis les véhicules remorqués, tractés ou poussés

il résulte à la fois des inégalités discordantes entre les deux files de rails en alignement droit, aux entrées et sorties de courbes, et de la marche sinueuse des essieux sur la voie ; il peut encore être augmenté par le manque de rigidité au gauchissement du wagon ;

— du *tangage*, mouvement de rotation *autour de l'axe YY* ; il est provoqué par l'affaissement non équilibré du wagon, au passage sur les joints de rails concordants ou par un déséquilibre des essieux (balourd, méplat) ;

— du *lacet*, mouvement de *rotation autour de l'axe ZZ*, et de *va-et-vient transversal* ; il résulte de la marche sinusoïdale des essieux et est accentué par le lacet secondaire, transmis au wagon par la liaison, fonctionnellement non rigide, entre l'essieu et le wagon. C'est le mouvement perturbateur le plus important ; c'est celui qui fatigue le plus le wagon et la voie.

Sur tous les wagons on trouve les mêmes éléments, les uns destinés à supporter, contenir, amarrer les chargements, les autres à permettre le roulement sur les rails (avec toute la sécurité désirable), la liaison avec les autres engins constituant le train, et la transmission de l'effort de traction ou de pousse. Ce sont :

— *le châssis* ;

— *la superstructure* (éventuellement) ;

— *les organes de roulement* et *de suspension* ;

— *les organes* assurant l'*attelage* et l'*amortissement des réactions et des chocs* ;

— *les organes* assurant *le freinage* (pour le ralentissement et l'arrêt).

14.1. Châssis. — C'est une structure résistante, généralement plane (fig. VI-38)) ; elle s'appuie sur les rails par l'intermédiaire des essieux et d'organes élastiques (les ressorts) destinés à éliminer ou réduire les effets des sollicitations auxquelles elle est soumise. Celles-ci proviennent des organes (crochet de traction, tendeur d'attelage) qui assurent la liaison élastique avec le véhicule voisin dans le train (engin moteur ou autre wagon) et des

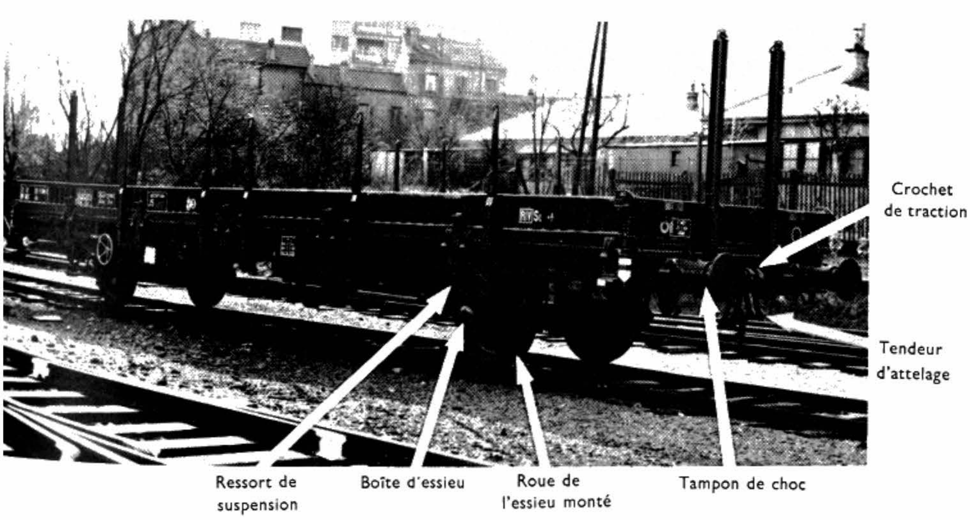


Fig. VI-38

Organes communs liés au châssis d'un wagon ; définitions (*S.N.C.F.*)

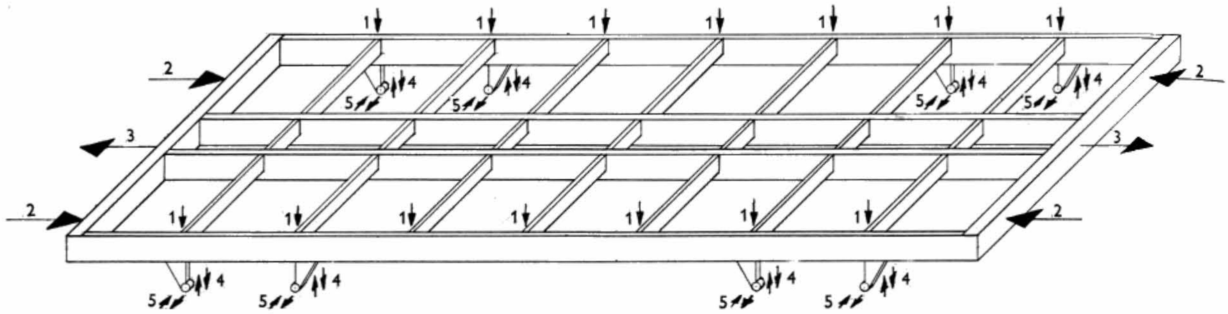


Fig. VI-39 — Sollicitations s'appliquant sur un châssis classique de wagon à deux essieux

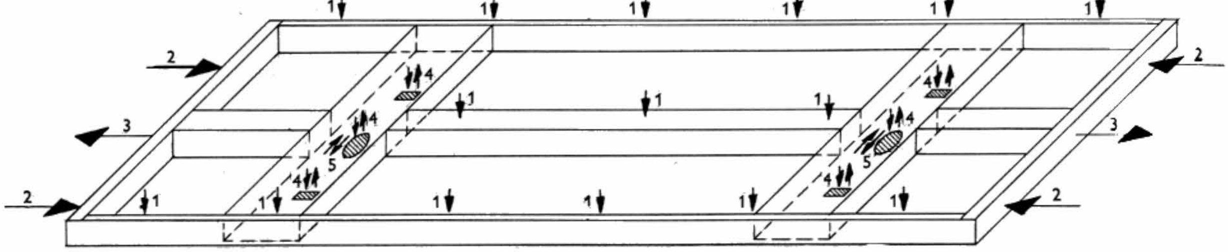


Fig. VI-40 — Sollicitations s'appliquant sur un châssis classique de wagon à deux bogies

organes de choc (tampons amortisseurs) qui diminuent l'effet des compressions de refoulement ou de freinage pendant la marche ou celui des chocs pendant les opérations de triage.

Sur le châssis est fixée, à demeure (fixe ou mobile) ou démontable, une superstructure, en un seul ou en plusieurs éléments séparés.

Il faut noter que certains wagons, semi-spécialisés ou spécialisés, présentent parfois des châssis surbaissés ou même entièrement dégagés entre les essieux (ou les bogies), pour permettre leur adaptation au genre de transport auquel ils sont destinés.

Le châssis constitue la partie la plus importante du wagon ; elle doit être très résistante, puisqu'elle est aussi la plus sollicitée comme l'indiquent les figures VI-39 (wagon à 2 essieux) et VI-40 (wagon à 2 bogies) ; elle subit, en effet, les efforts suivants :

(1) flexion et effort tranchant, dus à la charge ;

(2) compression sur les tampons ou axiale (dans le cas d'attelage automatique) ;

(3) effort de traction (au démarrage notamment) ;

(4) efforts alternés verticaux, transmis par la suspension (défauts de la voie, effets des courbes, oscillations de la partie suspendue) ;

(5) efforts alternés horizontaux ou de torsion, transmis par la suspension (balancement, roulis, lacet, réactions de la voie en courbes).

Les sollicitations (4) et (5) sont localisées particulièrement aux points d'application de la suspension pour les wagons à deux essieux et aux pivots de bogies pour les wagons à bogies ; c'est pourquoi la disposition des éléments résistants qui constituent la structure du châssis est différente suivant qu'il s'agit d'un *wagon à deux essieux* ou d'un *wagon à bogies*.

14.1.1. Châssis du wagon à deux essieux

— *Avec l'attelage à vis ordinaire.* — L'ensemble des sollicitations (1), (4), (5) est supporté par les longerons extérieurs (appelés brancards) et les sollicitations (2) par les traverses d'extrémité, avec report sur les longerons ; la

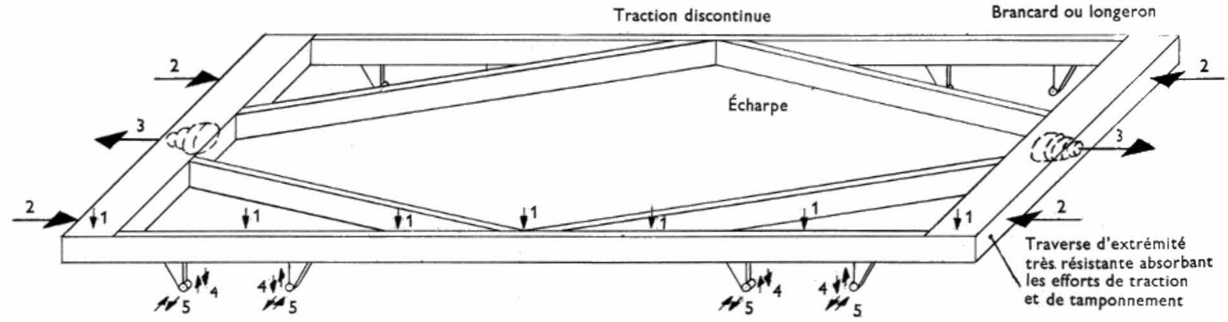
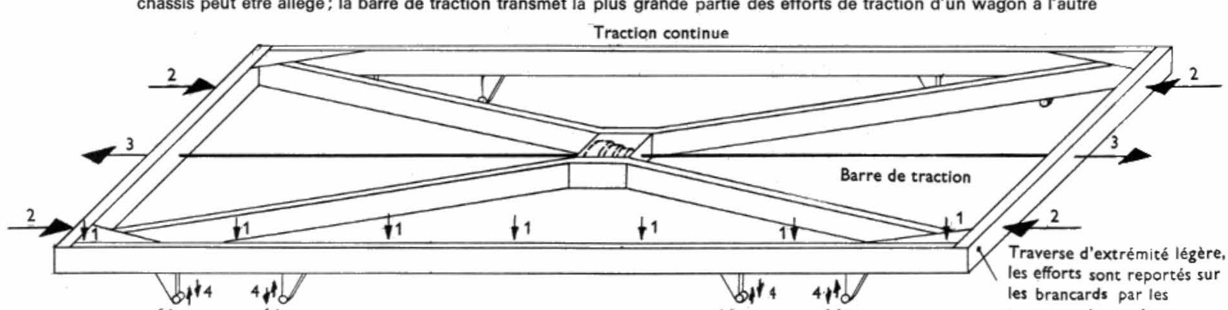


Fig. VI-41 : — En haut, traction discontinue ; le châssis est renforcé aux extrémités pour résister seul aux efforts de traction ; en bas, traction continue ; le châssis peut être allégé ; la barre de traction transmet la plus grande partie des efforts de traction d'un wagon à l'autre



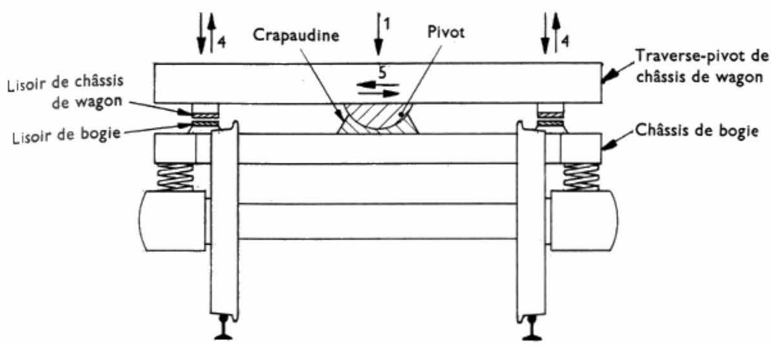
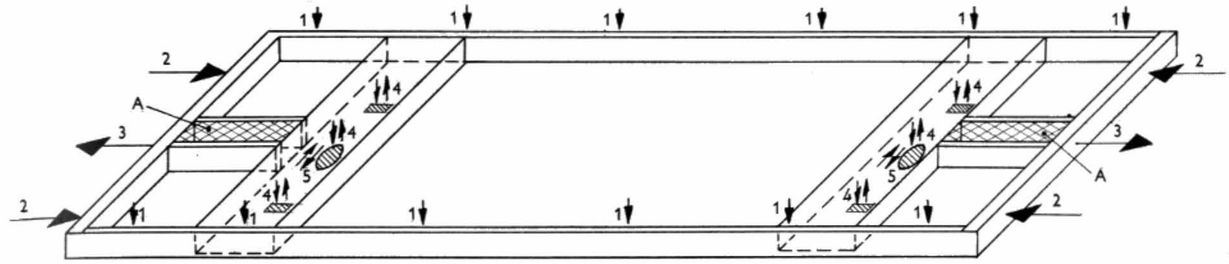


Fig. VI-42 — Liaison entre le châssis et le bogie, assurée par la traverse pivot

Fig. VI-43 — Logement de la traction discontinue du wagon à bogies, renforcé s'il y a lieu pour recevoir l'attelage automatique de choc et de traction ; châssis à brancards extérieurs



sollicitation (3), 1 MN, suivant le type de traction utilisé (fig. VI-41), est supportée à la fois par les longerons extérieurs et des longrines longitudinales (traction discontinue) ou, plus simplement, elle est transmise d'une extrémité à l'autre par une barre de traction (traction continue).

— *Avec l'attelage automatique de choc et de traction.* — Le même châssis, rendu apte à recevoir ultérieurement l'attelage automatique, doit être, en outre, conçu pour supporter dans la partie axiale les efforts que cet attelage pourra accepter, soit 1,5 MN au lieu de 1 MN. Lorsque les tampons latéraux ne seront plus utilisés, le châssis apte à l'attelage automatique, pourra être sensiblement allégé à la construction.

14.1.2. Châssis du wagon à deux bogies. — Pour permettre son appui sur les bogies, la structure (fig. VI-42) comporte deux traverses très renforcées (les traverses pivots) sur lesquelles s'exercent les sollicitations (1), (4), (5). Les longerons, s'ils sont latéraux, supportent les sollicitations (1), assujétissent la superstructure et transmettent les efforts de compression (2) et la plus grande partie des efforts de traction (3). Pour un tel wagon, un seul type de traction (discontinue) est utilisé ; les organes qui assurent la liaison avec les autres véhicules, sont placés dans un encagement constitué par l'ensemble « traverse d'extrémité-traverse pivot » (fig. VI-43), nettement renforcé dans la zone A si le wagon peut recevoir un attelage automatique. Cette disposition des longerons n'est toutefois pas unique car il est normal que le châssis se présente avec des structures disposées différemment, selon la façon dont les sollicitations dues à la charge (1) sont réparties et transmises aux pivots des bogies :

— chargement s'appuyant directement ou par l'intermédiaire d'une superstructure sur les éléments extérieurs, comme dans le cas de la figure VI-43 ;

— chargement (ou superstructure contenant le chargement) soutenu principalement par une poutre centrale, reliant les deux traverses pivots (fig. VI-44).

Dans les deux cas, suivant la longueur du châssis, l'importance des charges et leur répartition, les longerons extérieurs, comme la poutre centrale, sont, ou bien construits à l'aide de profilés de hauteur constante, laminés ou reconstitués, ou bien se présentent comme des poutres composées, de hauteur et de forme appropriées, tenant compte de la hauteur disponible entre le chargement et le rail, et du débattement nécessaire des bogies sous le châssis.

14.1.3. Exemples de structures et d'assemblages par soudure. — La figure VI-45 montre la disposition généralement adoptée pour un wagon plat à deux essieux ; elle indique les dimensions générales et celles des principaux éléments utilisés.

La figure VI-46 a, b et c représente le châssis d'un wagon plat à bogies, à longerons extérieurs ; quelques sections montrent la préparation des soudures et leur importance.

14.2. Superstructures. — Les matériels qui comportent uniquement un plancher en bois ou métallique, appliqué sur le châssis pour réaliser la surface d'appui du chargement, sans autre disposition, sont rares. En général, le châssis reçoit, soit des organes fixes ou mobiles permettant l'amarrage du chargement, soit une superstructure ouverte ou fermée, avec ou sans autres dispositifs, fixes ou amovibles.

Les superstructures, comme les châssis, sont essentiellement réalisées avec des profilés, des tôles découpées, planes, pliées ou embouties ; l'assemblage de ces éléments entre eux est obtenu par soudure, s'il s'agit de métaux de même nature ou par rivets (ou rivelons) dans le cas d'assemblages hétérogènes.

C'est par la superstructure, en général, que se différencient entre elles les trois catégories de wagons : types courants, semi-spécialisés, et spécialisés.

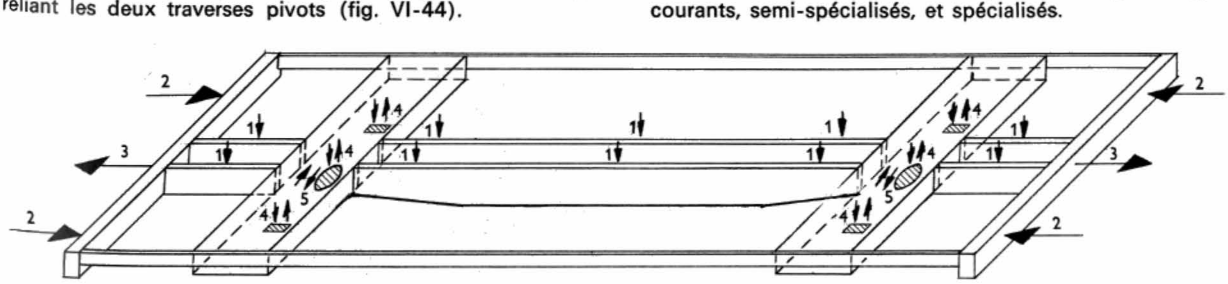


Fig. VI-44 — Type de châssis à longerons centraux formant poutre, généralement d'égale résistance

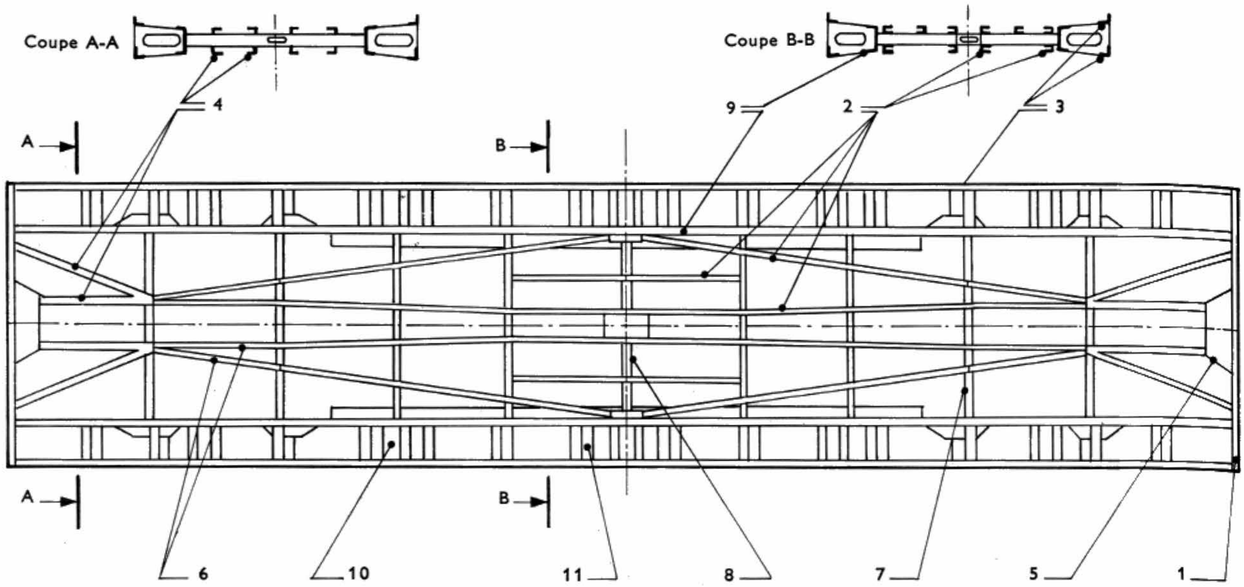
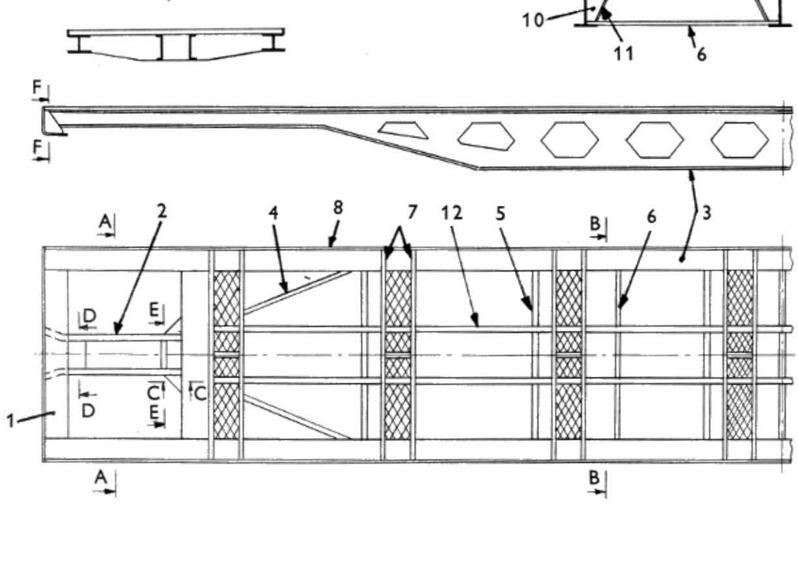


Fig. VI-45 — Structure du châssis d'un wagon plat à deux essieux, à traction continue, renforcé pour recevoir ultérieurement un attelage automatique de choc et de traction

Repères	Profils	Aciers utilisés
11	⎾ ép. : 6	Acier R ⩾ 54 au Cu
10	⎍ ép. : 6	Acier R ⩾ 54 au Cu
9	[Profilé 70 × 40 × 6	Acier R ⩾ 40
8	I Profilé 120 × 58 × 5,1	Acier R ⩾ 40
7	[Profilé 120 × 55 × 7	Acier R ⩾ 40
6	L Profilé 80 × 50 × 7	Acier R ⩾ 40
5	— ép. : 10	Acier R ⩾ 40
4	L Profilé 100 × 100 × 12	Acier R ⩾ 40
3	L Profilé 90 × 60 × 8 / 80 × 80 × 8	Acier R ⩾ 40
2	[Profilé 240 × 85 × 9,5	Acier R ⩾ 40
1	[Profilé 150 × 90 × 10	Acier R ⩾ 40

Repères	Profils	Matières
12	[AP 175	Acier E 26
11	— 100 × 10	Acier E 26
10	Tôle ép. 10	Acier E 24
9	Tôle ép. 10	Acier E 24
8	— 50 × 10	Acier E 26
7	L 60×40×6	Acier E 26
6	IPE 100	Acier E 26
5	HE 140 A	Acier E 26
4	HE 140 B	Acier E 26
3	I	Acier E 26
2	[AP 300	Acier E 26
1	[Tôle ép. 10	Acier E 26

Fig. VI-46 a — Structure du châssis d'un wagon plat à deux bogies, à brancards extérieurs



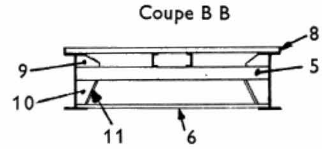
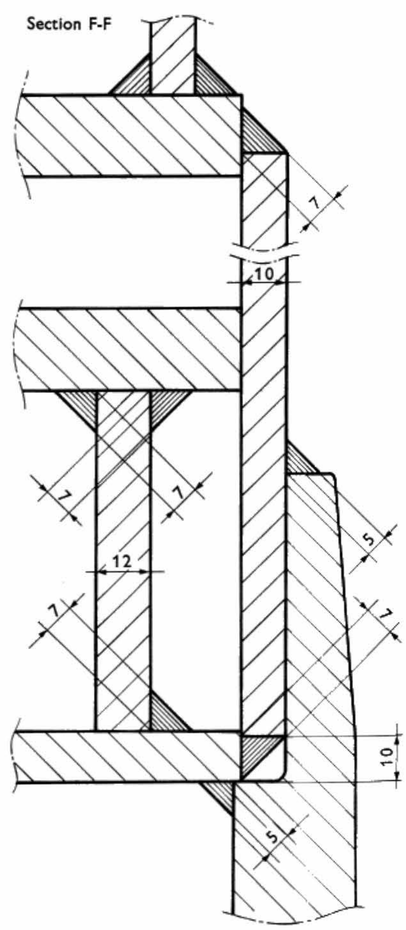
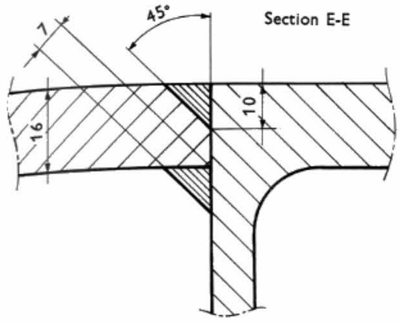
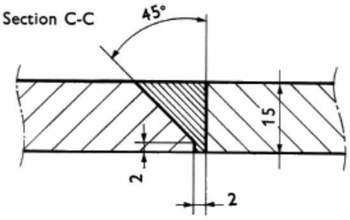


Fig. VI-46 b — Préparation et importance des soudures pour quelques assemblages fortement sollicités







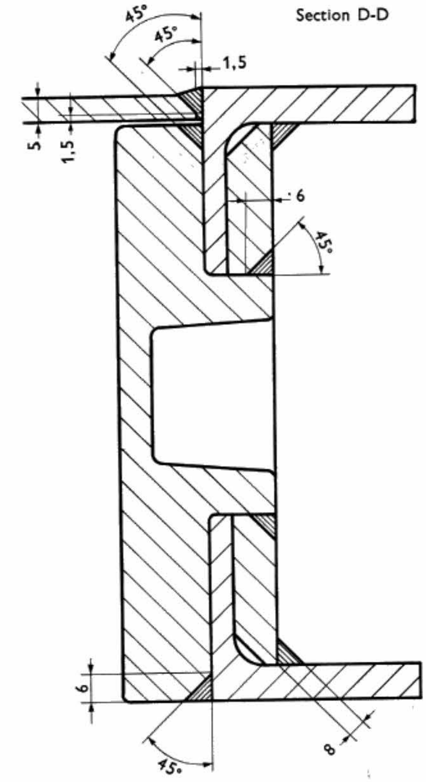


Fig. VI-46 c



Fig. VI-47 — Wagon plat de type courant à 2 bogies; ranchers latéraux pivotants, haussettes d'extrémité rabattables vers l'extérieur; plancher en bois avec 8 lambourdes escamotables dans son épaisseur (*S.N.C.F.*)

On peut donc trouver :

— Un *plancher* qui répartit la charge et en permet soit le glissement, soit l'amarrage ; il est, le plus souvent complété par :

• des *ranchers pivotants* ou *amovibles* destinés à retenir latéralement ou en bout, les chargements encombrants ; ces organes (fig. VI-47) ont une longueur et une résistance suffisantes pour assurer la fixation et le serrage des pièces, (conditionnées ou non) à l'aide de cordages, câbles, chaînes, etc. ;

• des *bords*, relativement bas (appelés *haussettes*), placés latéralement et en bout, et dont le rôle est d'empêcher le glissement hors de la plate-forme des marchandises de petites dimensions ou de celles chargées en vrac. Ces bords peuvent être fixes ou rabattables pour les wagons de types courants (V. fig. VI-32) ; ils peuvent être, également, discontinus ; c'est le cas pour les wagons spécialisés affectés au transport des « coils » chargés à chaud (fig. VI-48). Dans ce cas le châssis métallique est, en outre, isolé thermiquement en certaines zones pour protéger les organes de freinage et de traction discontinue ;

• des *lambourdes*, fixes ou rabattables (V. fig. VI-47) qui permettent de mettre en place et de retirer, sans difficulté, à l'aide de grues, palans, portiques, des pièces de grande longueur, la saillie des lambourdes laissant un passage entre pièces et plancher pour les chaînes ou les cordes de levage ;

• des *bords hauts*, constituant une caisse ouverte à la partie supérieure, avec ou sans portes latérales, destinée à contenir des marchandises pondéreuses en vrac, généralement chargées et déchargées à la benne. Les parois de bout peuvent comporter une large ouverture, fermée normalement par une porte oscillante, placée horizontalement, et destinée au déchargement par basculage longitudinal (V. fig. VI-34).

— Une *charpente métallique* complexe, constituant, grâce à un panneautage en bois contreplaqué, en tôle d'acier ou en alliage d'aluminium exceptionnellement, une caisse fermée qui protège les marchandises contre les intempéries.

La caisse peut ne comporter que des ouvertures latérales pour le chargement et pour l'aération (V. fig. VI-33). Elle peut aussi recevoir un deuxième plancher pour permettre une meilleure utilisation de sa capacité dans le cas de marchandises peu denses et peu résistantes (s'il y a impossibilité de gerbage sur plus de 1 m de hauteur, par exemple). L'intérieur peut également comporter (fig. VI-49)

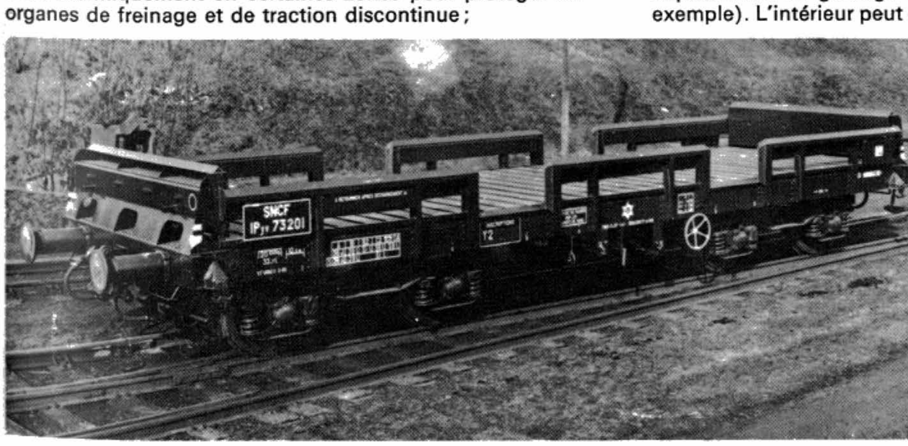
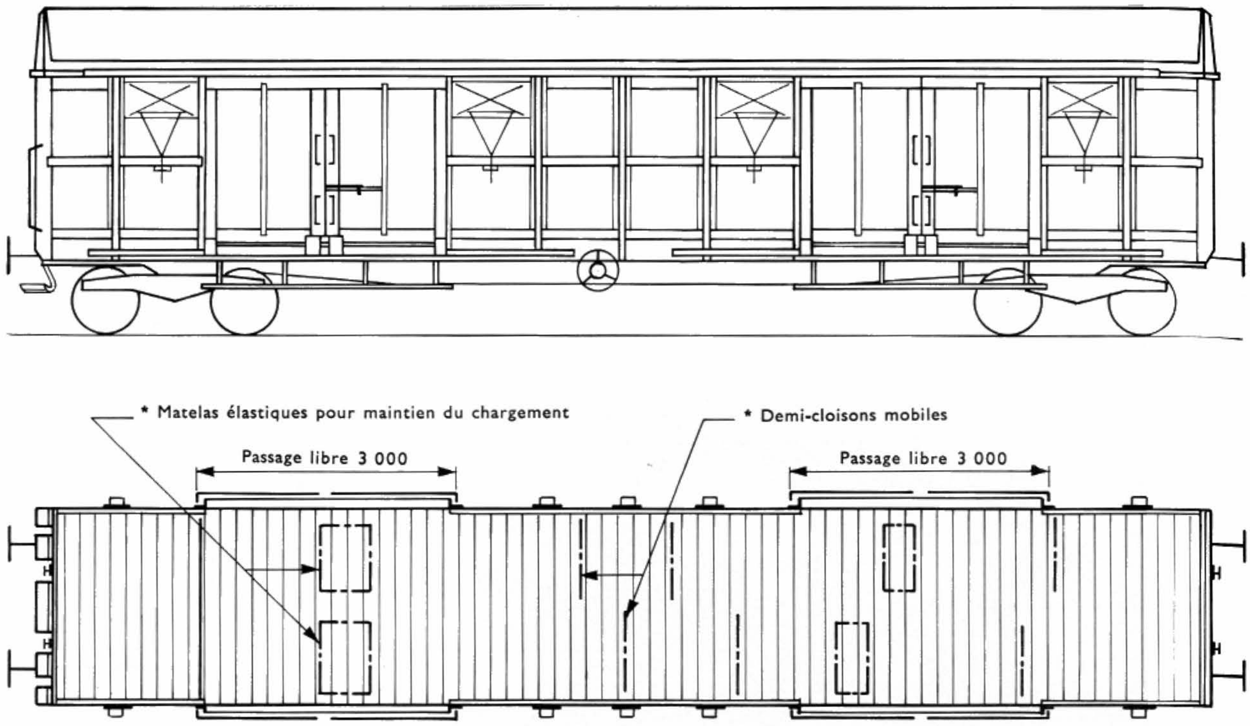


Fig. VI-48

Wagon plat spécialisé au transport de « coils », chargés à chaud ; le plancher métallique est partiellement isolé thermiquement au droit des organes de traction et de freinage ; haussettes latérales fixes et discontinues ; haussettes de bout avec dispositifs amortisseurs des chocs dus au déplacement du chargement (*S.N.C.F.*)



Wagon à caisse classique avec panneaux suspendus et matelas pneumatiques pour le calage des chargements (clé de chargement)

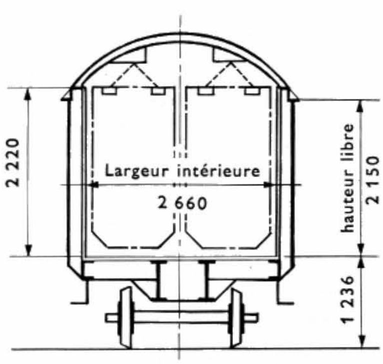
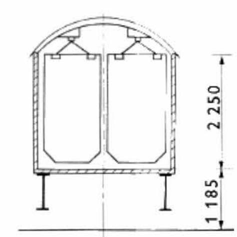
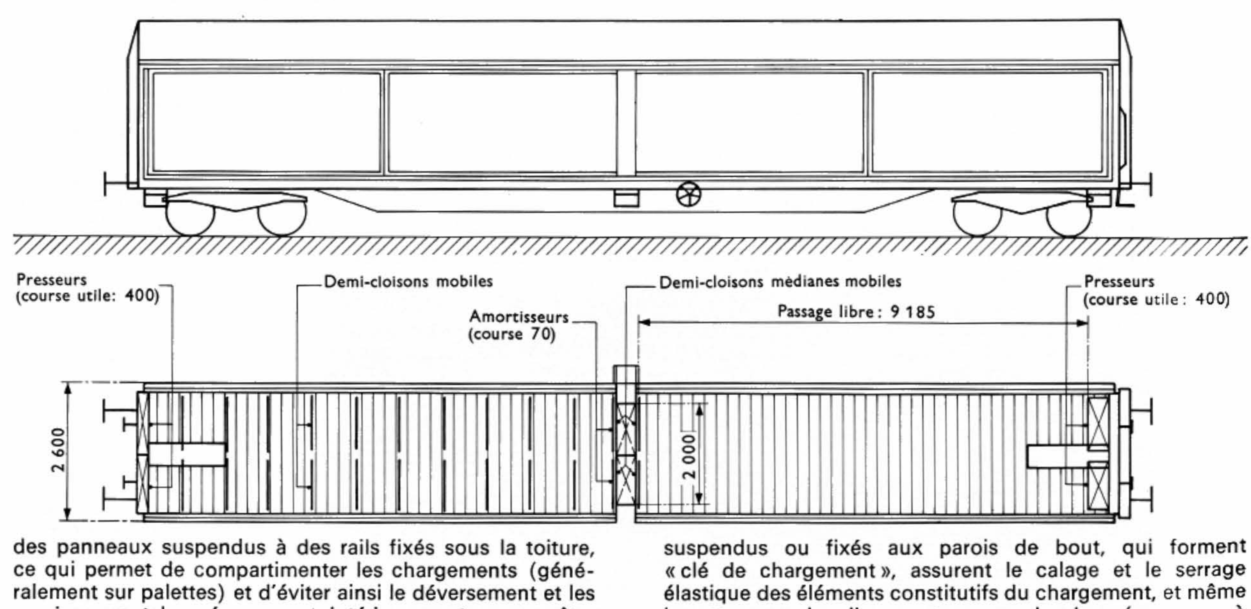


Fig. VI-49 — Aménagement intérieur de wagons couverts semi-spécialisés à bogies



Wagon à faces ouvrantes, avec panneaux suspendus, dispositifs amortisseurs en caoutchouc et dispositifs presseurs pour le rattrapage des déplacements et le calage des chargements



des panneaux suspendus à des rails fixés sous la toiture, ce qui permet de compartimenter les chargements (généralement sur palettes) et d'éviter ainsi le déversement et les avaries ; un tel aménagement intérieur peut encore être complété par des éléments mobiles (matelas élastiques) suspendus ou fixés aux parois de bout, qui forment « clé de chargement », assurent le calage et le serrage élastique des éléments constitutifs du chargement, et même le rattrapage du glissement en cas de choc (presseurs à course de 400 mm).

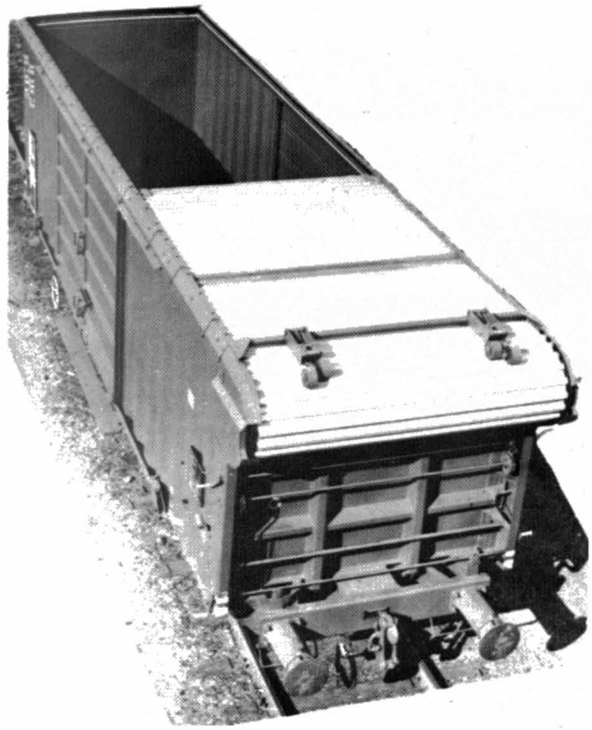


Fig. VI-50 — Wagon couvert semi-spécialisé à toit ouvrant; caisse en tôle d'acier; toiture enroulable en alliage d'aluminium pour chargement et déchargement par le haut; 1 ouverture par face latérale pour la manutention ordinaire, avec double porte coulissante (*S.N.C.F.*)

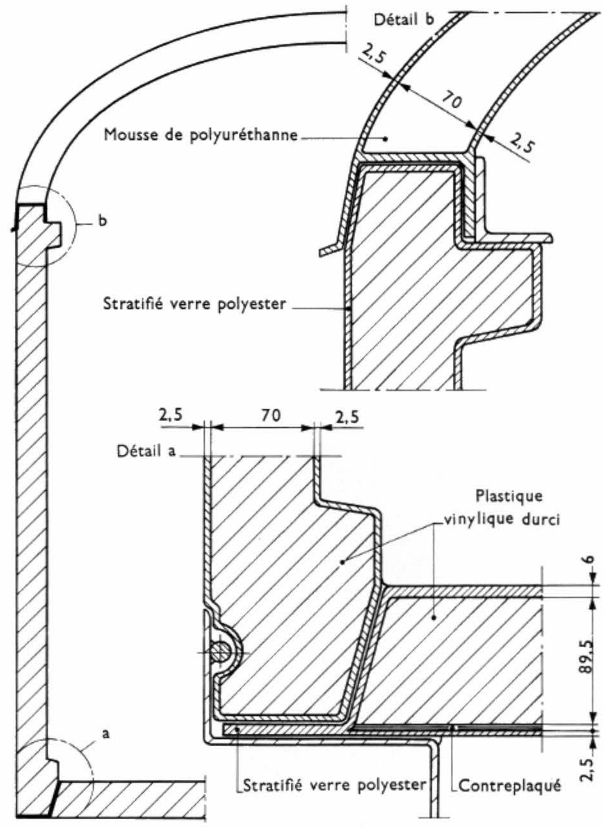


Fig. VI-53 — Coupes de parois de wagons réfrigérants ou frigorifiques; caisse en matière plastique

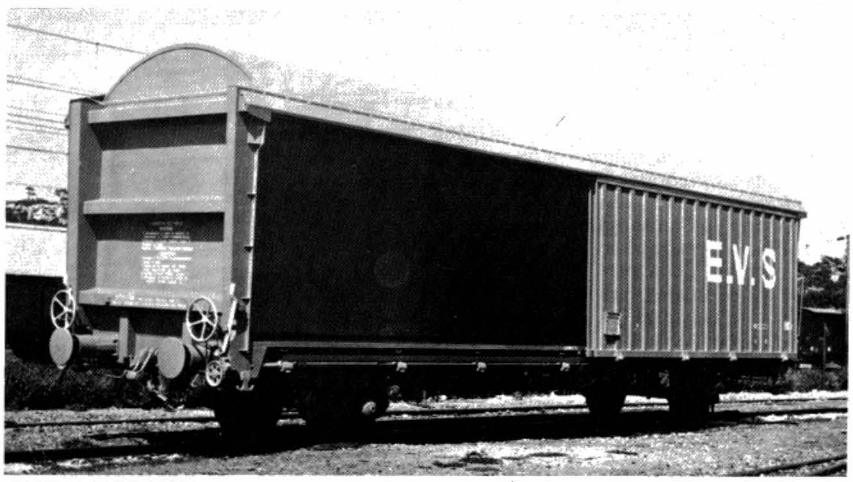
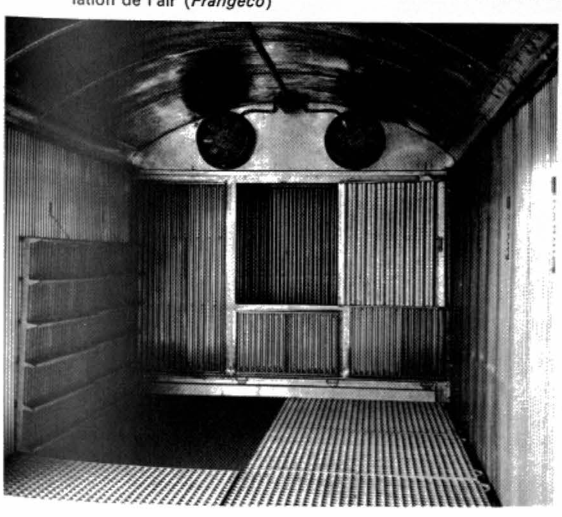


Fig. VI-51 — Wagon couvert à faces ouvrantes semi-spécialisé; caisse et toiture en tôle d'acier; portes latérales coulissantes en alliage d'aluminium (*S.N.A.V.*)

Fig. VI-52 — Intérieur d'un wagon réfrigérant, en acier inoxydable; isolation par mousse de polyuréthanne; on voit le compartiment à glace hydrique, les ventilateurs, les caillebotis alvéolés permettant la circulation de l'air (*Frangéco*)



La *toiture de la caisse* peut s'ouvrir et même s'effacer totalement pour permettre la mise en place du chargement par le haut (fig. VI-50); les faces latérales peuvent être entièrement constituées d'éléments qui se déplacent parallèlement à l'axe du wagon, dégageant ainsi de larges ouvertures et permettant la manutention mécanique, soit en partant du sol (hauteur du plancher au sol: 1,35 m environ) ou d'un quai de chargement (distance du quai au rail: 1,15 m) (fig. VI-51).

De plus, la *caisse* peut être entièrement *isolante:* wagons isothermes, réfrigérants (à glace hydrique), frigorifiques (à machinerie mécanique, à glace carbonique, à azote liquide; fig. VI-52 et VI-53).

— Un ensemble d'éléments métalliques formant *trémies ouvertes* pour certaines marchandises en vrac (combustibles solides, sables, cailloux, engrais, etc., V. fig. VI-54). Suivant la nature de la marchandise à transporter, cette superstructure peut comporter une *toiture* fixe ou mobile; dans ce dernier cas, elle est généralement *basculable*.

Les faces sont fixes ou mobiles; lorsqu'elles sont fixes, des dispositifs spéciaux, placés à la partie inférieure, assurent le déchargement, soit dans des fosses centrales



Fig. VI-54

Wagon semi-spécialisé à deux essieux et deux trémies, fermé, à toiture basculante pour produits craignant la pluie ; on voit les goulottes pour le déchargement latéral ainsi que la commande de la toiture et son dispositif d'équilibrage à ressort (*S.N.C.F.*)

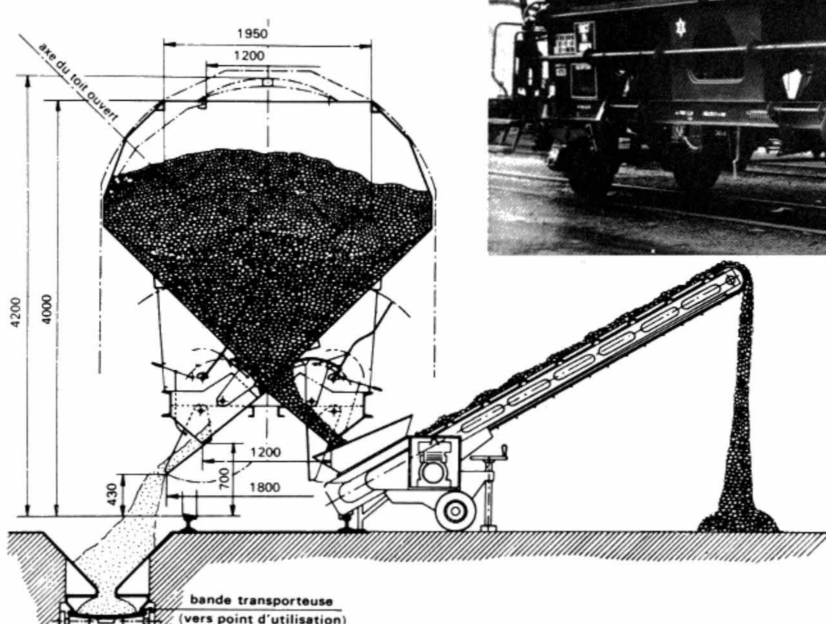


Fig. VI-55

Schéma montrant la position des goulottes

À gauche : goulottes relevées permettant le déchargement bilatéral à 1,800 m de distance

À droite : goulottes abaissées, permettant le déchargement bilatéral directement par les goulottes fixes à 1,200 m

ménagées entre les deux files de rails, soit latéralement, sur fosses, sur bandes transporteuses ou sur sauterelles. Ces dispositifs comportent des *registres plans*, à *casques*, ou *cylindriques*, le plus souvent réglables, avec des *goulottes fixes* et des *goulottes mobiles* pour régler la distance du flot d'écoulement par rapport à la voie (fig. VI-55). Lorsqu'elles sont mobiles, leur partie inférieure constitue de larges portes horizontales, permettant ainsi un déchargement massif, non contrôlé.

Si la partie supérieure est fermée (transport de céréales, de produits pulvérulents), elle comporte toutefois des ouvertures de *chargement* de petites sections, obturables pendant le transport. À la partie inférieure, des *trappes* permettent la *vidange par gravité* (wagon à céréales) ou, grâce à une installation particulière sur le wagon, par l'*action d'air pulsé* (wagon à ciment).

— Une *superstructure* en forme de *berceaux* pour loger correctement les rouleaux de tôle moyenne ou fine, destinés aux industries de transformation (automobile en particulier) (fig. VI-56) ; un tel wagon peut être encore complété par des dispositifs de protection contre les intempéries (pluie, neige) ; c'est le cas du *wagon à capots télescopiques* (fig. VI-57).

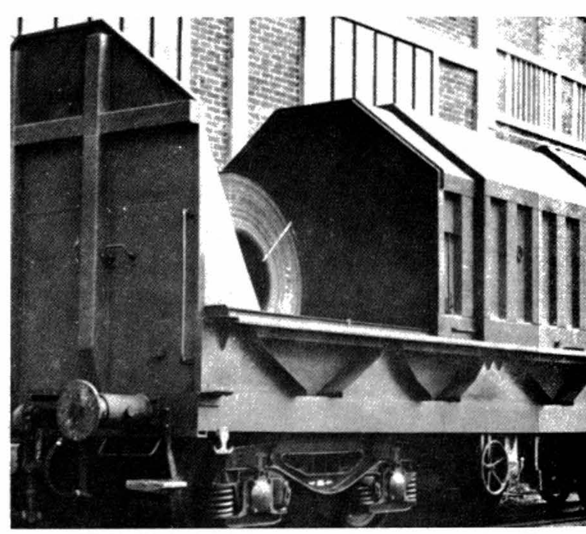


Fig. VI-57 — Wagon spécialisé dans le transport des rouleaux de tôle, avec protection contre les intempéries par capots téléscopiques (*S.N.C.F.*)

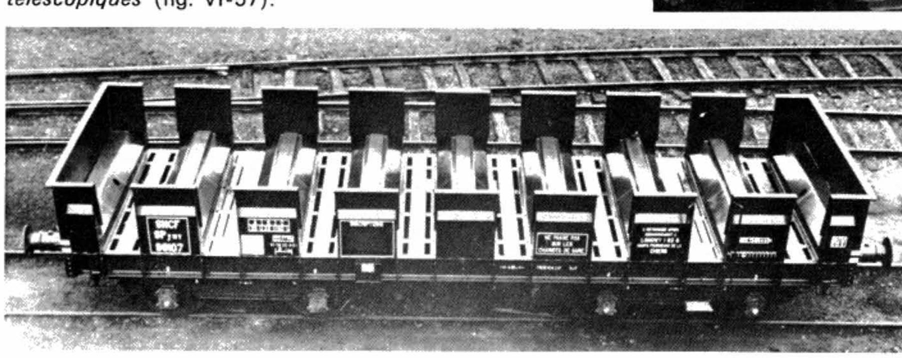


Fig. VI-56 — Wagon spécialisé dans le transport des rouleaux de tôle ; plancher métallique en forme de berceaux pour le logement et le calage du chargement, parois latérales en créneaux pour le passage des « cés » de manutention (*S.N.C.F.*)

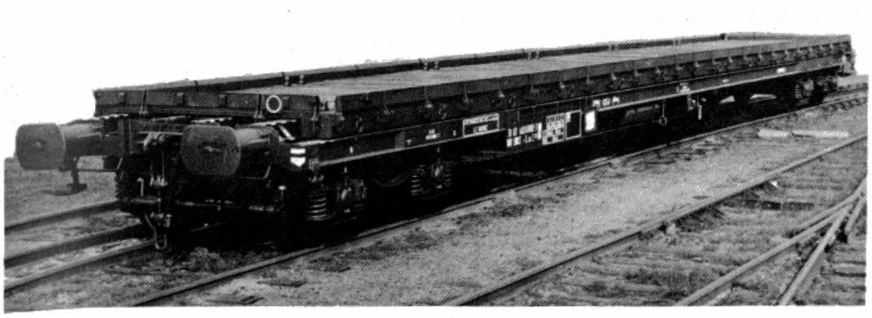


Fig. VI-58

Wagon spécialisé dans le transport des transconteneurs; plate-forme mobile reliée au châssis par des dispositifs élastiques et des amortisseurs de course 500 mm, avec rappel de remise en place après chaque choc; remarquer les petites haussettes latérales et de bout, rabattables, ainsi que les chevilles escamotables pour l'amarrage des transconteneurs par leurs pièces de coin inférieures (*S.N.C.F.*)

— Une *plate-forme mobile*, reliée élastiquement au châssis pour le transport des marchandises fragiles ou des transconteneurs, qui ne circulent pas en « trains-blocs » (fig. VI-58).

— Un réservoir cylindrique, destiné au transport des produits pétroliers, des produits chimiques, des produits vinicoles, des alcools, etc. se chargeant par un dôme supérieur et se déchargeant bilatéralement par le bas, grâce à des tubulures convenablement disposées. Lorsque la marchandise est sous pression (cas des gaz liquéfiés) le réservoir doit être particulièrement résistant; la tôle utilisée, de qualité spéciale, peut avoir jusqu'à 15 ou 16 mm d'épaisseur, et la pression d'épreuve imposée par la réglementation en vigueur peut atteindre 30 bars. La citerne peut comporter un pare-soleil (fig. VI-59) ou même être entièrement calorifugée.

— Une construction très complexe, telle que celle d'un wagon spécialisé destiné au *transport des automobiles* (fig. VI-60) pour leur livraison directe par les constructeurs, ou au *transport des camions*, de leurs *remorques routières*, ou des *semi-remorques* tirées sur la route par un tracteur, qu'elles soient adaptées ou non, au trafic mixte rail-route: wagons « *kangourou* » (fig. VI-61), wagon « *poche* » (V. fig. VI-62).

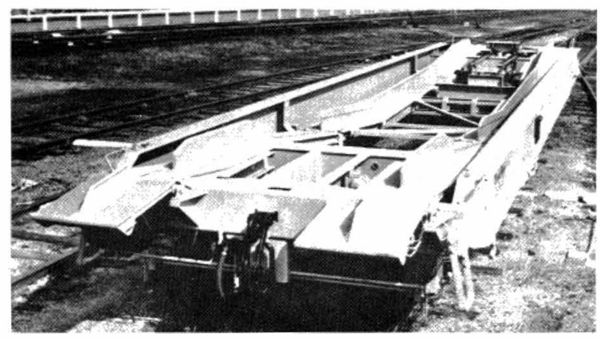
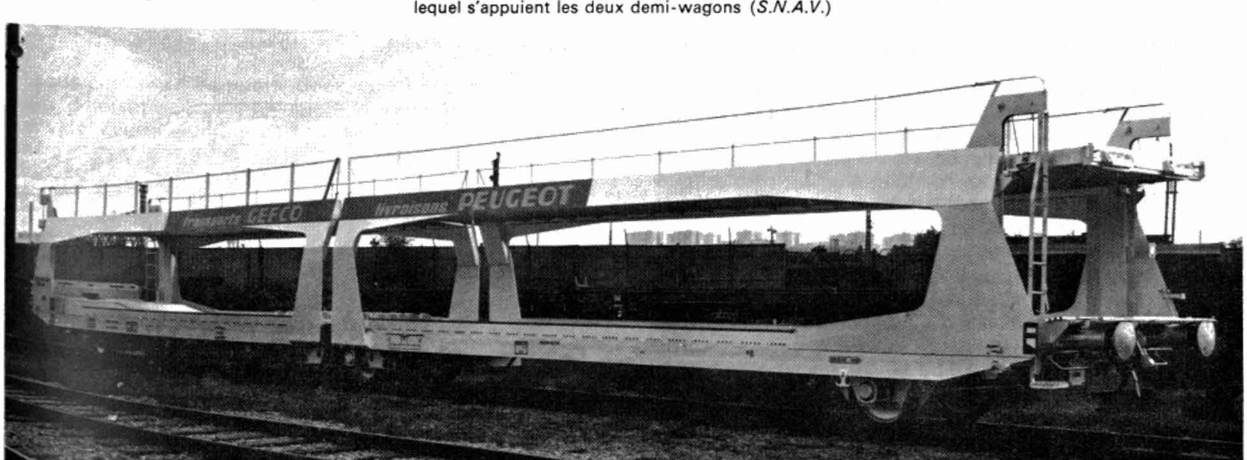


Fig. VI-61 — Wagon spécialisé dans le transport de semi-remorques routières; la partie mobile du plancher (à la manière d'un pont-levis) sert de logement pour le train de roues arrière et permet d'augmenter ainsi le volume utile (*S.N.C.F.*)



Fig. VI-59 — Wagon-citerne à bogies; vidange avec dispositif de sécurité à fermeture rapide; noter la présence d'un pare-soleil qui permet de réduire la pression d'épreuve imposée (*S.N.C.F.*)

Fig. VI-60 — Wagon à trois essieux, spécialisé dans le transport de seize voitures automobiles; l'essieu central est porté par un petit châssis spécial sur lequel s'appuient les deux demi-wagons (*S.N.A.V.*)



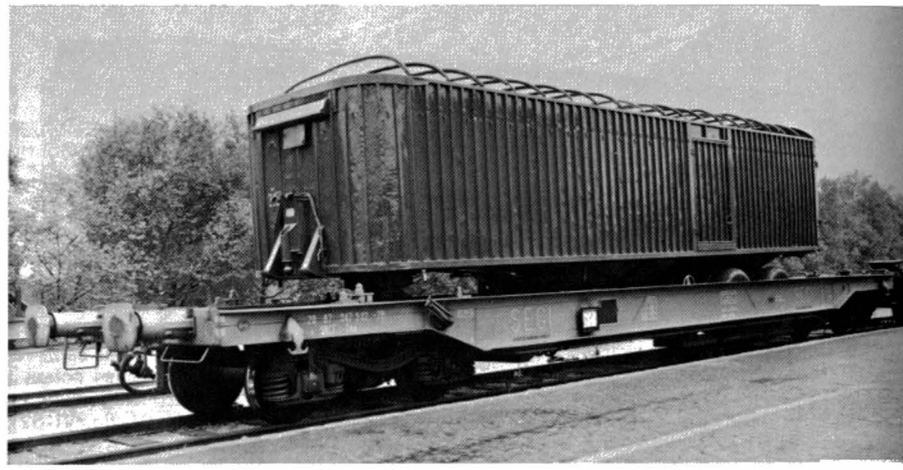
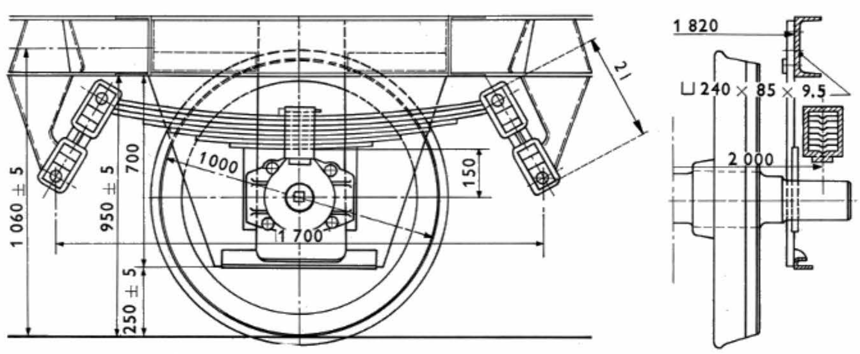


Fig. VI-62

Wagon à poche fixe, spécialisé dans le transport des semi-remorques, remorques, camions et transconteneurs (*S.N.C.F.*)

Fig. VI-63

Constitution de la suspension « à double anneau »



— Des caisses métalliques à parois épaisses, fortement isolées, fermées par des couvercles emboîtants, et destinées à des wagons spécialisés au *transport de lingots chauds*, entre fonderies et laminoirs, parfois distants d'une centaine de kilomètres.

14.3. Organes assurant le roulement et la suspension

14.3.1. Roulement. — Les essieux ont déjà été décrits (V. § 4.3.) ; ceux qui équipent le matériel à marchandises moderne sont conçus pour supporter une charge totale de 20 000 kg ; équipés de *boîtes d'essieu* à rouleaux, ils permettent la circulation à une vitesse de 120 km/h, sans aucune restriction.

14.3.2. Suspension

1° *Wagons à deux essieux.* — Les wagons modernes sont tous munis de la suspension longue dite « *à double anneau* », avec ressorts à lames ; elle est utilisable jusqu'à la vitesse de 100 km/h, sans restriction (fig. VI-63). Une telle disposition assure, dans le sens transversal, une force de rappel par gravité, qui croît plus vite avec le déplacement de l'ensemble « essieu-boîte d'essieu-ressort » que s'il s'agissait d'anneaux simples. En effet, jusqu'au moment où la pièce de liaison vient en contact avec la butée du support de suspension, l'ensemble des deux anneaux (longueur 2 *l*) reste dans un même plan et l'essieu est soumis au rappel du pendule de longueur 2 *l* ; ce n'est que lorsque le contact est établi que le rappel est assuré par un pendule de longueur sensiblement égale à *l*, comme avec des anneaux simples.

2° *Wagons à deux bogies.* — Ces wagons sont équipés depuis 1968, d'un bogie adopté par l'U.I.C. sur le plan international comme *bogie standard* (fig. VI-64, page suivante et hors-texte couleur) ; il s'agit du bogie type Y 25 Cs (utilisable jusqu'à 100 km/h) ou type Y 25 Css (prévu pour la vitesse de 120 km/h) ; l'importance des commandes a entraîné l'installation d'outillages et de chaînes de montage très importants (V. hors-texte).

La suspension de ce bogie est réalisée par des groupes de ressorts hélicoïdaux dont l'action est conjuguée avec

1. Appendices du longeron
2. Anneaux obliques
3. Coupelle reposant sur le ressort
4. Ressort en hélice
5. Piston solidaire du frottoir
6. Boîte d'essieu
7. Frottoir
8. Pièces en contact (faces usinées)
9. Appendices du châssis de bogie

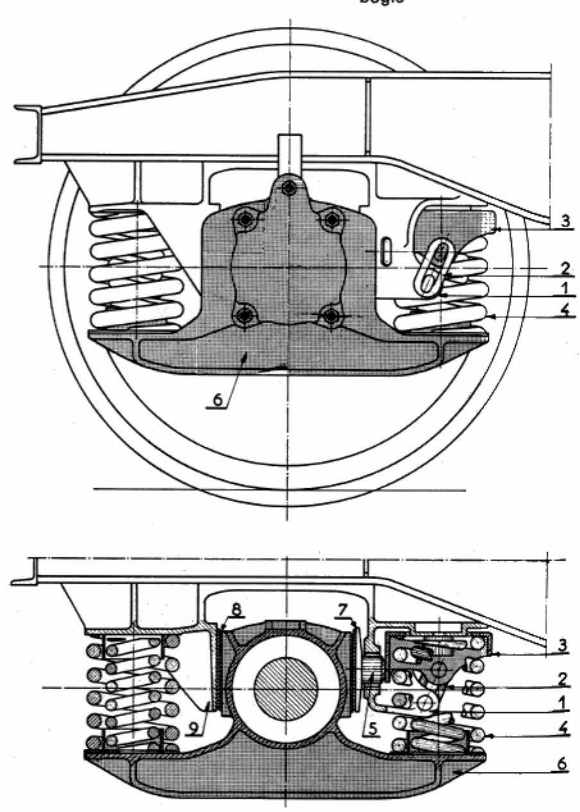


Fig. VI-65 — Amortisseur S.N.C.F.-Lenoir ; l'effort exercé sur le piston est proportionnel à la charge suspendue supportée par le ressort

celle d'un dispositif amortissant les oscillations horizontales et verticales, proportionnellement à la charge suspendue (fig. VI-65). Les boîtes d'essieux sont munies d'appendices latéraux sur lesquels s'appuient les ressorts ;

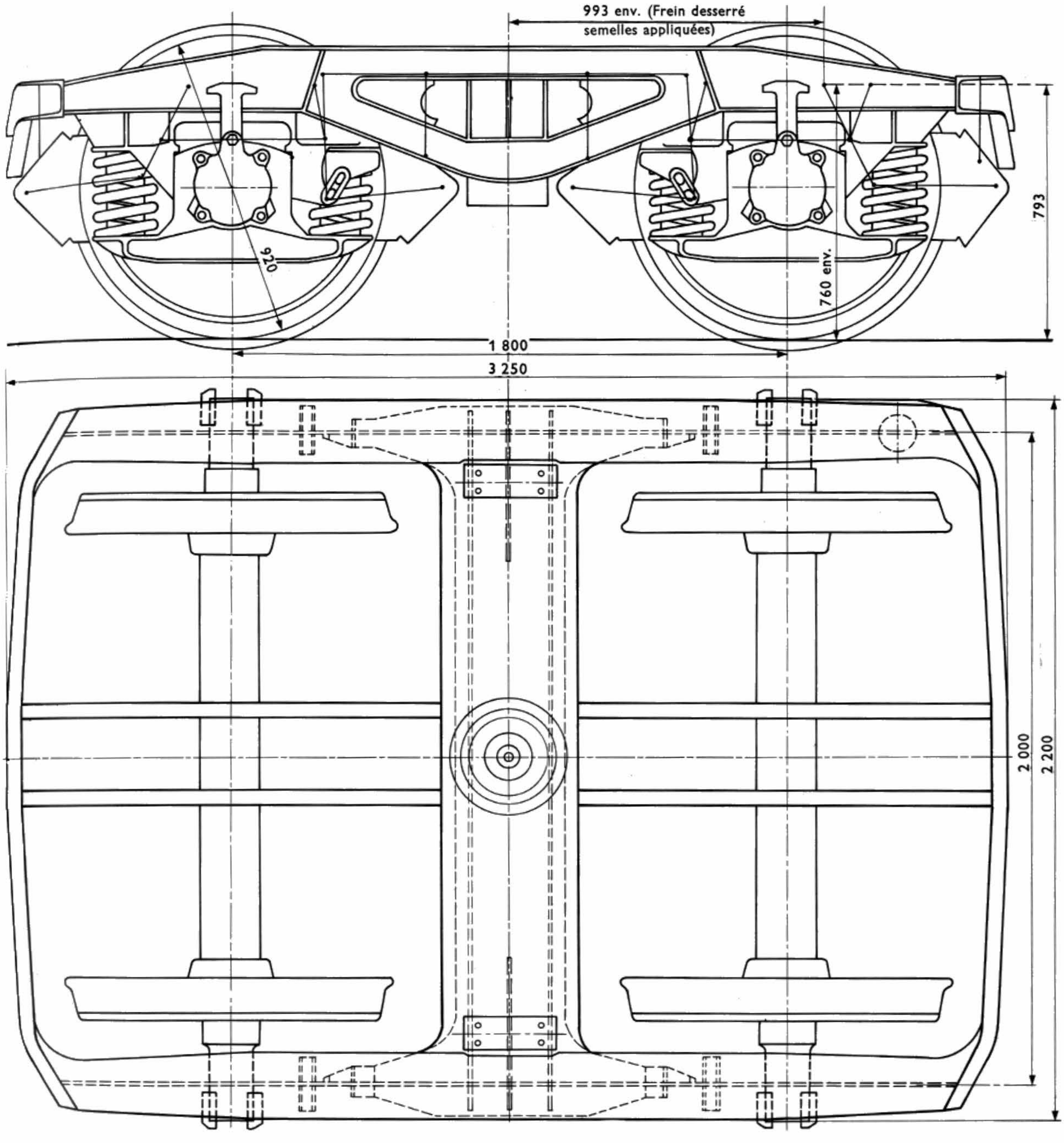


Fig. VI-64 — Dimensions et caractéristiques principales du bogie Y 25 Cs apte à supporter une vitesse de 100 km/h (*S.N.C.F.*)

chaque groupe en comporte deux, concentriques, de hauteurs différentes, l'un intervenant seul, lorsque le wagon est vide, l'autre ajoutant son action lorsque le wagon est chargé ; ainsi se trouve réalisée une suspension amortie à deux étages de flexibilité, qui assure la meilleure sécurité, en marche, (et surtout à vide), contre le déraillement.

14.4. Organes assurant l'attelage et l'amortissement des réactions et des chocs

14.4.1. Attelage à vis. — Il est identique à celui décrit au paragraphe 2.2, 5° ; toutefois la liaison avec le châssis est, sauf exception, obtenue d'une façon plus rudimentaire que sur les voitures.

14.4.2. Tampons latéraux amortisseurs des chocs et des réactions. — Ils sont construits et fonctionnent sur les mêmes principes que ceux qui équipent le matériel pour voyageurs (V. § 2.2) ; pour le matériel à marchandises, ces organes ont une course de 105 mm. Le contact élastique, entre deux véhicules voisins, est réalisé par l'attelage à vis, serré de telle façon que les tampons soient seulement en contact, avec parfois une légère compression. Il existe de nombreuses variantes de tampons que l'on peut, suivant la nature du ressort, classer en :

— *tampon à ressort caoutchouc* (V. fig. VI-66) ;
— *tampon à ressort-bagues* (V. fig. VI-67) ;
— *tampon hydraulique* (V. fig. VI-68).

Ces tampons présentent des courbes de caractéristiques différentes (V. fig. VI-69), justifiant à la fois leur utilisation et leur prix.

Remarques :

— L'emploi de l'attelage automatique de choc et de traction est également prévu (V. chap. 7).

— Des organes assurant le freinage et l'arrêt équipent les divers matériels à marchandises (V. chap. 8).

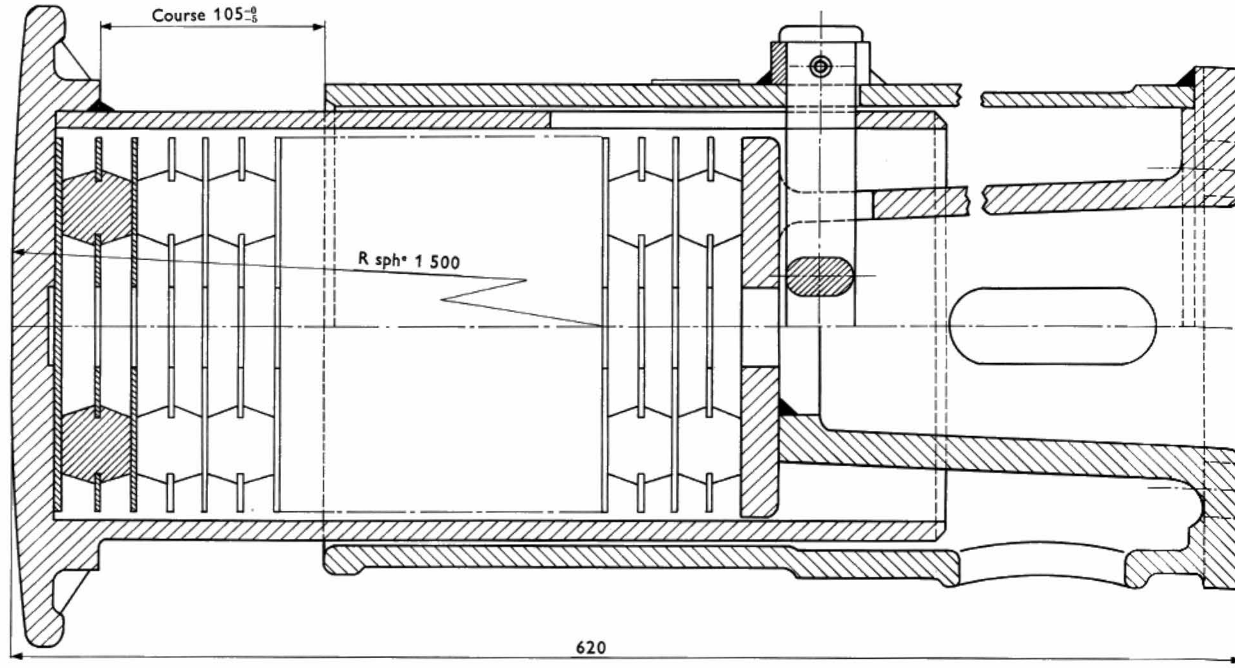


Fig. VI-66 — Tampon de 620 mm à course de 105 mm, ressorts en éléments rondelles acier-caoutchouc (*S.N.C.F.*)

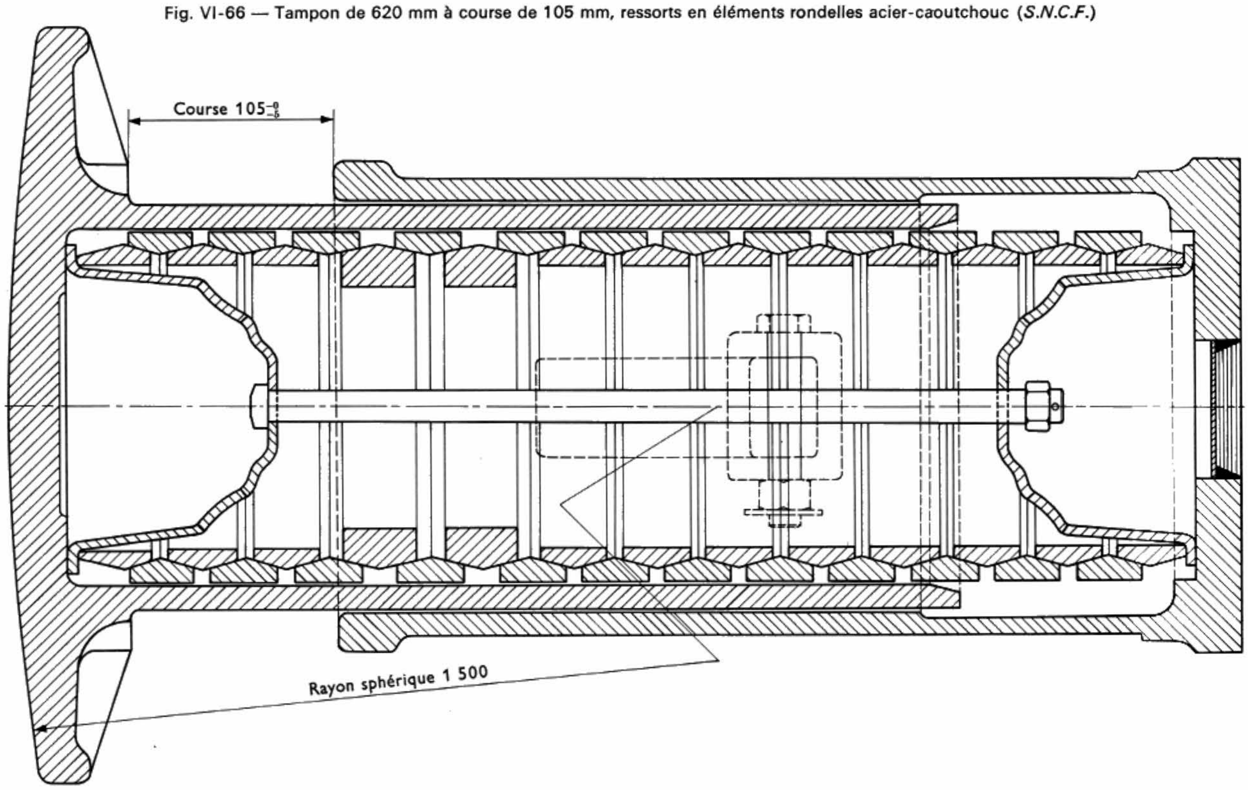


Fig. VI-67 — Tampon de 620 mm, à course de 105 mm ; ressort à friction en acier ; éléments-bagues coniques mâles et femelles (*S.N.C.F.*)

15. PROCESSUS SUIVI POUR L'ÉTUDE ET LA CONSTRUCTION DES WAGONS

15.1. Recherche des formes et dimensions à donner aux structures d'un wagon

15.1.1. Respect du gabarit international défini par l'Unité technique. — Quelles que soient ses caractéristiques (dimensions extérieures, écartement des essieux ou des pivots de bogies, jeux fonctionnels latéraux, flexibilité de la suspension), le maître-couple doit être déterminé pour permettre la circulation du *wagon chargé* et *vide* sur toutes les voies des réseaux qui ont accepté ce gabarit (fig. VI-70) ; des réductions de largeur sont donc à calculer par rapport au gabarit autorisé, d'une part, dans les sections situées entre les essieux (ou les pivots de bogies), d'autre part, dans les sections situées entre les essieux (ou les pivots) et les traverses d'extrémité. Il est admis que le wagon doit pouvoir circuler attelé sur des courbes de 250 m de rayon, en voie de 1,465 m de largeur.

15.1.2. Respect du « poids sur rails » par essieu et du « poids par mètre courant » de longueur sur les ouvrages d'art. — Le « poids sur rails » de 20 000 daN par essieu, admis par les réseaux, correspond à la valeur limite acceptable de l'action sur les rails, des deux roues de chacun

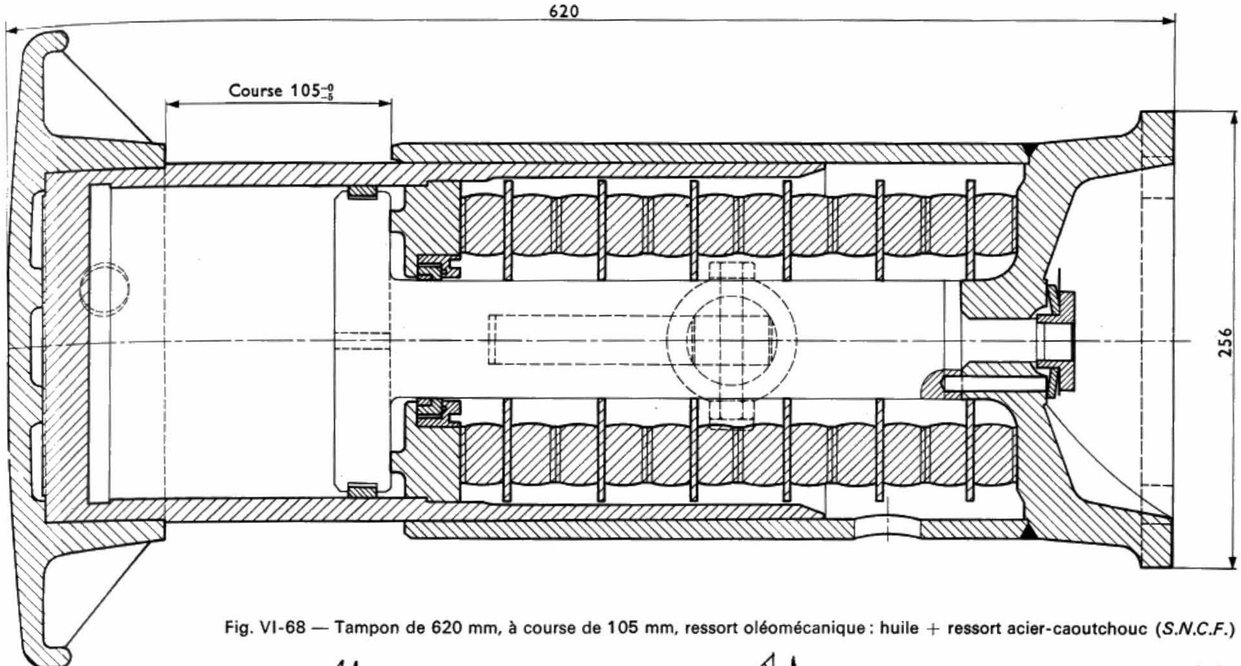


Fig. VI-68 — Tampon de 620 mm, à course de 105 mm, ressort oléomécanique : huile + ressort acier-caoutchouc (*S.N.C.F.*)

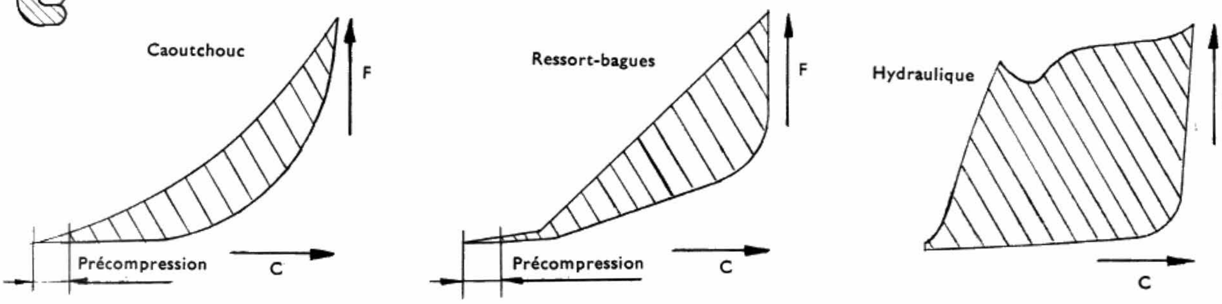


Fig. VI-69 — Courbes des caractéristiques du fonctionnement des tampons : 1° à ressort en éléments acier-caoutchouc ; 2° à ressort à friction ; 3° « hydraulique »

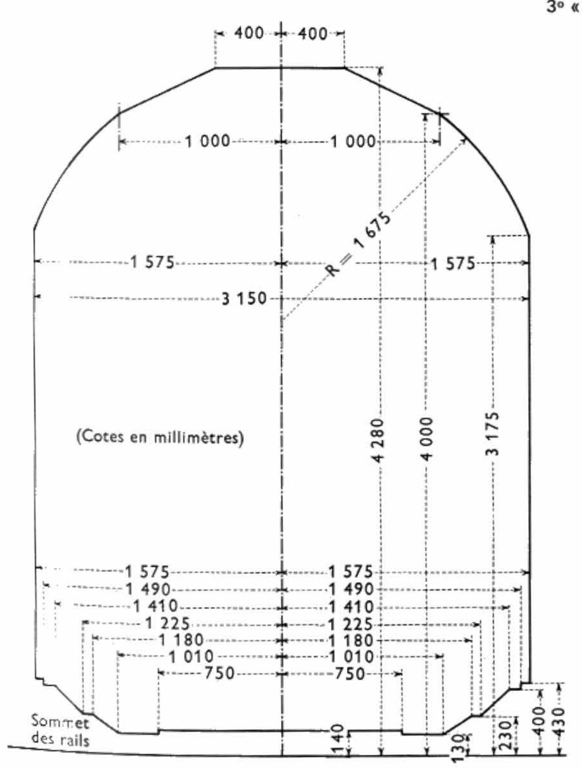


Fig. VI-70 — Gabarit international défini par l'Unité technique pour la largeur de voie de 1,435 m

des essieux du wagon ; le « poids total admissible du wagon sur les rails » (poids du wagon vide augmenté du poids maximal du chargement) est donc égal au produit :

$$20\ 000\ \text{daN} \times n$$

n désignant le nombre d'essieux du wagon.

Le « poids par mètre courant » est le quotient du « poids total sur rails » du wagon chargé par sa longueur totale, tampons compris ; la valeur maximale admise est 8 000 daN. On peut aussi dire que la « masse sur rails » par essieu est de 20 000 kg et que la « masse par mètre courant » admise est de 8 000 kg.

15.1.3. Bosses de débranchement des triages et rampes d'accès sur les ferry-boats. — Le profil des bosses de débranchement est unifié par l'U.I.C. sur le plan international (fig. VI-71).

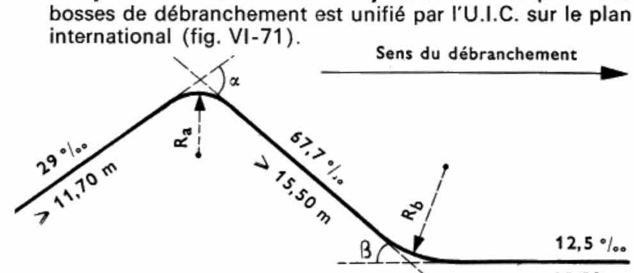


Fig. VI-71 — Profil unifié des bosses de débranchement dans les triages

Le wagon doit pouvoir circuler également sur les rampes d'accès et les courbes des ferry-boats, rampes dont l'inclinaison peut atteindre 3°30′ tandis que les rayons des courbes peuvent ne pas dépasser 90 m ;

15.1.4. Passage en courbes. — Le wagon à deux essieux doit pouvoir rouler à vitesse réduite sur une courbe

de 150 m de rayon, à 1,435 m de largeur de voie, sans qu'il soit nécessaire de prendre des mesures particulières et sans qu'il y ait risque d'avarie ou de déraillement. Dans les mêmes conditions, le wagon à deux bogies doit pouvoir circuler, isolément, sur des courbes de 75 m et, pour certains types, par rotation libre des bogies, sur des courbes de 35 m de rayon.

15.1.5. Détermination des dimensions et de la disposition des membrures. — Le bureau d'études tient compte, d'une part, des règles précédentes et, d'autre part, de la nature et de l'importance des chargements prévus (nature de la marchandise, conditionnement, densité), de leur disposition sur le wagon (charges uniformément réparties, charges concentrées, charges sur appuis), du rôle du wagon vis-à-vis de la marchandise et des moyens utilisés pour sa manutention. Il détermine les dimensions générales, précise la disposition des membrures principales du châssis et de la superstructure, la nature des matériaux de construction à employer et la section des éléments résistants.

15.1.6. Calcul des sections. — Le châssis, considéré séparément, et les éléments de la superstructure constituent, généralement, un ensemble hyperstatique à joints rigides ; on les calcule par la méthode la mieux appropriée aux résultats recherchés et qui peuvent être plus ou moins précis suivant le cas ; on effectue donc, soit :

— des calculs simplifiés (résistance aux moments de flexion et aux efforts tranchants), donnant des résultats approchés suffisants, si la recherche de la réduction de la masse à vide (la tare) n'est pas prépondérante et si l'utilisation, par exemple, des profilés laminés du commerce est préconisée ;

— des calculs plus poussés (en utilisant, par exemple, la méthode énergétique ou la méthode des déplacements), si l'ensemble « châssis-caisse » doit avoir une tare faible, de façon à obtenir le rapport de la charge à la tare le plus élevé possible. Il en est de même si le maître-couple calculé est si proche du gabarit de chargement autorisé qu'il est obligatoire d'imposer une flexion maximale admissible sous l'action du chargement prévu (c'est le cas, notamment des wagons de grande longueur, avec grand écartement des pivots de bogies).

— les *réactions d'appuis* ou *de liaisons*, entre les éléments du châssis ou de la superstructure.

Les épreuves dynamiques permettent de vérifier la résistance des structures (éléments constructifs et assemblages) et celle des parties mobiles accrochées aux structures résistantes, sous l'effet des chocs (chocs entre wagons pendant les opérations de triage, impacts des chargements déplacés sur les éléments fixes ou mobiles, réactions de freinage par sabots-cales ou freins de voie) et des efforts latéraux ou verticaux amplifiés par les défauts de la voie. Au cours de ces essais, on utilise des *jauges extensométriques* pour mesurer les contraintes résultant, dans les structures, des efforts appliqués aux véhicules.

Les jauges sont placées :

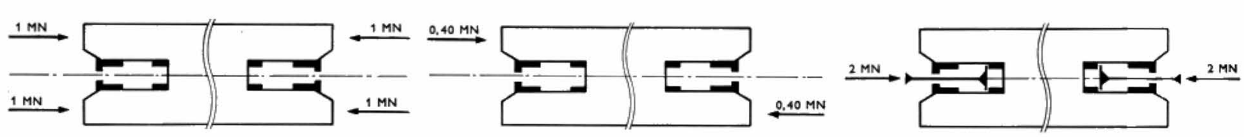
— dans toute zone considérée comme non critique, aussi près que possible de la fibre neutre de l'élément travaillant, de façon à vérifier le taux de travail moyen de cet élément ;

— dans les zones d'assemblage et pour tous les éléments particulièrement sollicités, à la fois aussi près que possible des bords de l'assemblage ou de l'élément testé (axe de la jauge à 10 mm au maximum) et au voisinage de la fibre neutre, de façon à déterminer le taux de travail maximal de l'assemblage et le taux de fatigue moyen des éléments qui y aboutissent ; des jauges en rosettes à trois directions peuvent être utilisées pour déterminer l'orientation des efforts au droit des assemblages.

Les essais sont arrêtés lorsque les limites de contrainte sont atteintes. Dans certains cas, ils sont poursuivis au-delà de ces limites, par exemple, lorsque cela présente un intérêt certain pour l'appréciation du matériel expérimenté et pour la détermination ultérieure des modifications à apporter aux structures.

Une vérification soignée des assemblages et des éléments très sollicités, est effectuée après chaque type d'essai afin de détecter des amorces de fissures, des décollements de soudure, des déformations permanentes.

1° *Essais statiques.* — Les principaux essais effectués sur le châssis-caisse sont les efforts de compression sur les tampons (en diagonale et dans l'axe) les efforts de traction, dans l'axe (fig. VI-72), et les efforts résultant des charges verticales simples, en tenant compte du type du wagon en



15.1.7. Recherche des meilleures solutions d'assemblages. — Le bureau d'études et le bureau de fabrication recherchent, ensemble, les meilleures solutions d'assemblages pour réaliser les liaisons les plus économiques et les plus satisfaisantes (facilité d'exécution, qualité, protection contre la corrosion).

15.2. Essais. — L'expérience montre que les calculs ne peuvent que « dégrossir » les problèmes soulevés par des constructions aussi complexes et qui doivent satisfaire de trop nombreux impératifs, souvent imparfaitement définis ; il y a donc toujours intérêt à construire un prototype qui sera « testé » avant la construction de la série (lors d'essais effectués au banc dans la grande majorité des cas). Des essais complémentaires seront exécutés au cours de circulations spécialement organisées (ou exceptionnellement, en service normal), pendant une durée plus ou moins longue, si les informations recherchées n'ont pu être fournies par les essais au banc.

15.2.1. Essais effectués au banc sur wagon prototype. — Ils comportent des *épreuves statiques* et des *épreuves dynamiques*.

Les premières sont destinées à vérifier la capacité du wagon à supporter :

— les *efforts de compression* et *de traction* rencontrés en service ;

— les *sollicitations* diverses *du fait des chargements* (efforts verticaux amplifiés par les mouvements perturbateurs de la circulation) ;

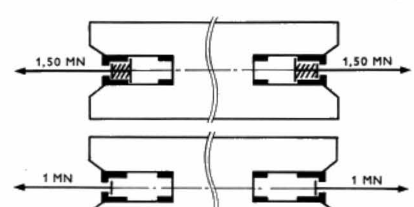


Fig. VI-72

Essais statiques de compression et de traction

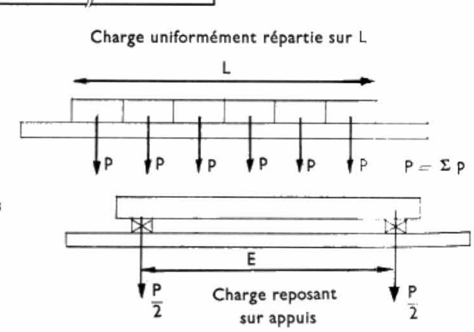


Fig. VI-73

Essais statiques de charges verticales simples

essai. Pour cette raison on place les charges de différentes façon (fig. VI-73) :

— *charges uniformément réparties*, appliquées symétriquement par rapport à l'axe longitudinal et à l'axe transversal du wagon. Lorsqu'il s'agit de wagons de type courant

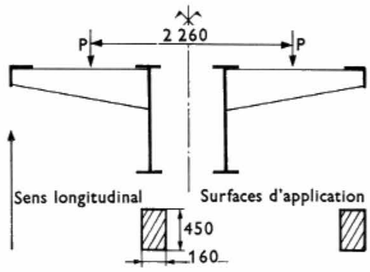
ou semi-spécialisé, avec plancher plan, les charges intéressent soit une largeur de 1,20 m, soit toute la largeur, selon la sollicitation la plus défavorable pour le châssis. Pour les wagons semi-spécialisés ou spécialisés à superstructure sans fond plat, l'essai est exécuté avec le chargement maximal autorisé ;

— *charges reposant sur deux appuis* (dont la largeur est au moins de 200 mm), appliquées symétriquement par rapport à l'axe longitudinal et à l'axe transversal du wagon ; elles intéressent, soit une largeur de 1,200 m soit toute la largeur du plancher, selon la sollicitation la plus défavorable pour le châssis ;

— *charges localisées sur une console* (fig. VI-74).

Fig. VI-74

Essai de charge localisée sur une console



Avant et pendant l'exécution de ces essais statiques, il y a lieu de mesurer les déformées longitudinales et transversales des éléments les plus sollicités, et selon le type de wagon, les variations d'écartement des faces au droit des portes, au niveau du battant de pavillon et des lisses, et plus généralement, toutes les déformations, même élastiques, susceptibles de nuire au fonctionnement correct des organes mobiles tels que : portes, trappes, toitures basculables ou enroulables, etc.

2° *Essais dynamiques.* — Les essais de tamponnement à vide ne sont exécutés que lorsque l'on veut vérifier certains effets d'inertie (en particulier : liaison entre châssis et bogies ou tenue des superstructures).

Les essais de tamponnement sous charge sont exécutés pour vérifier les superstructures ; ils ne sont pas à réaliser avec les wagons plats.

— *Tamponnement à vide.* — Le wagon vide tamponne en alignement droit, à des vitesses croissantes, jusqu'à un maximum de 15 km/h, un wagon identique à 2 essieux ou à bogies, à l'arrêt, non freiné ; celui-ci est chargé de charbon pulvérulent sec ou d'une autre marchandise de telle façon que le niveau de son centre de gravité soit le même que celui du wagon essayé sous la charge maximale admissible et il est équipé de tampons latéraux, ou d'un amortisseur axial, similaires à ceux qui équipent ce wagon.

Pour les wagons réfrigérants, cet essai est pratiqué dans les mêmes conditions, avec leur provision complète d'agent réfrigérant ou un lest correspondant.

— *Tamponnement sous charge.* — Les mêmes essais sont exécutés, mais le wagon est chargé au maximum de sa capacité.

On mesure les contraintes dans les zones situées derrière les tampons (ou derrière les butées de l'attelage automatique) et au voisinage de toutes les liaisons entre le châssis et la suspension (wagons à deux essieux et bogies séparés) ou entre le châssis et le bogie (wagons à bogies). On s'assure en outre, qu'il n'y a aucune déformation, décollement ou fissure, susceptible d'empêcher le service normal du wagon.

3° *Limites de contraintes acceptées, au cours des essais au banc.* — Elles dépendent, d'une part, de la nature du matériau employé et, d'autre part, de la façon dont la sollicitation considérée est appliquée (application progressive et d'une certaine durée, ou au contraire effort brutal pendant un temps très court) ; on peut accepter des valeurs plus grandes dans les zones situées en dehors des nœuds d'assemblages que dans les assemblages eux-mêmes.

Par exemple, pour un acier E 24, on admettra :

— pour la compression (essai statique) ou pour les chocs (essai dynamique) une limite de 22,5 hbar dans les assemblages et 24 hbar en pleine poutre ;

— pour les charges verticales (essai statique), 11 hbar seulement dans les assemblages (de façon à tenir compte des surcharges, dues aux oscillations verticales et aux réactions de la voie).

15.2.2. Essais exécutés au cours de circulations spéciales. — Ils ont pour but de déterminer la *fatigue* en certaines zones des structures du wagon (ou du bogie), repérées pendant les essais au banc (statiques et dynamiques) et qui peuvent être l'objet de sollicitations en service normal, mais dont la prise en considération était impossible au banc.

En outre, ils permettent de vérifier les *qualités de stabilité du roulement* sur la voie et de *sécurité contre le déraillement* de l'ensemble « châssis-caisse », toujours plus ou moins rigide, quoi qu'on fasse.

Au cours des essais statiques il a été tenu compte de la part dynamique de la charge supportée en service en utilisant un *coefficient de surcharge moyen, constant* pour l'ensemble du wagon.

Au contraire, les mesures de contraintes exécutées dans le cadre d'essais de circulation permettent de connaître cette part dynamique, *spécifiquement pour chaque point de mesure*, par les contraintes maximales et minimales (δ_{max} et δ_{min}) et en faisant intervenir la contrainte mesurée statiquement (δ_{st}) au même point.

1° *Limites de contraintes, acceptables aux points singuliers des structures.* — On enregistre statiquement la contrainte δ_{st} aux points considérés ; on rééquilibre ensuite le pont de mesure et, en circulation, on détermine les contraintes δ_{max} et δ_{min} dont les valeurs oscillent autour de la contrainte statique précédemment enregistrée ; on calcule algébriquement :

$$R = \frac{\delta_{st} + \delta_{min}}{\delta_{st} + \delta_{max}} \text{ en chacun des points singuliers}$$

Des courbes, établies expérimentalement, permettent de connaître, en fonction de R, pour chaque point en cause, la valeur de la contrainte admissible, compte tenu de l'acier utilisé ; aucune valeur absolue des sommes algébriques $(\delta_{st} + \delta_{min})$ ou $(\delta_{st} + \delta_{max})$ ne doit dépasser la contrainte admissible donnée par la courbe intéressée.

Par exemple, pour un bogie en acier laminé E 26, dans une zone particulièrement sollicitée, la contrainte admissible peut ne pas dépasser 8 hbar.

2° *Vérification de la stabilité du roulement et de la sécurité contre le déraillement.* — On vérifie :

— la *qualité de marche ;* on estime qu'il faut satisfaire l'inéquation : $\bar{H} + \delta < 0{,}50\ (1 + \frac{2}{3} Q_0)$

$\bar{H}$: effort transversal moyen mesuré au niveau des boîtes d'essieux, aussi bien en alignement droit (lacet) qu'en courbes (réaction du rail sur la roue)

δ : écartement type des efforts $\bar{H}$

Q_0 : poids moyen, par roue, du wagon sur le rail.

— l'*effort maximal sur la voie;* il faut avoir :

$$H_{max} \leqslant 0{,}85\ (1 + \frac{2}{3} Q_0)$$

H_{max} : effort transversal maximal, au niveau des boîtes d'essieu ;

— les *accélérations horizontales* et *verticales*, et la *fréquence du lacet*, qui ne doivent pas dépasser certaines limites, suivant la charge, la vitesse de circulation et la nature du chargement qui influe directement sur le wagon.

16. CARACTÉRISTIQUES D'EXPLOITATION DES PRINCIPAUX TYPES DE WAGONS MIS À LA DISPOSITION DE L'EXPLOITANT (réseau ferroviaire) ET DE L'UTILISATEUR (client)

Le tableau de la page 194 reprend les plus importantes de ces caractéristiques :

— la *vitesse maximale*, permise par les organes de roulement, de suspension, et de freinage ;

— les *dimensions utiles* pour le chargement (longueur, largeur, surface, volume) ;

Caractéristiques d'exploitation des principaux types de wagons mis à la disposition de l'exploitant (réseau ferroviaire) et de l'utilisateur (client)

Wagons		Roulement	Vitesse et régime et freinage (1)	Dimensions utiles				Charges acceptées							Valeur de					
				Lon-gueur L	Largeur l	Surface S	Volume V	Totales ou uniformément réparties sur la longueur			Uniformément réparties sur une distance déterminée		Sur appuis séparés par une distance déterminée		$\frac{C}{S}$			$\frac{C}{V}$		
								C en tonnes			Distance	Charge	Distance	Charge	t/m²			t/m³		
Type	Désignation		km/h	m	m	m²	m³	Ro	S	SS	m	t	m	t	Ro	S	SS	Ro	S	SS
COURANT	**Plat**	2 essieux	80 - 100	12,500	2,770	34,6	—	26,5	22,5	—	2 5 8	16 19 23	— — —	— — —	0,76	0,65	—	—	—	—
		2 bogies	80 - 100	18,500	2,770	51	—	56,5	48,5	—	2 5 9 15	32 35 36 44	2 5 9 15	33 36 38 56	1,1	0,95	—	—	—	—
	Tombereau	2 essieux	80	8,760	2,760	24,1	36,2	30	—	—	—	—	—	—	1,24	—	—	0,82	—	—
		2 bogies	80 - 100	12,800	2,760	35,3	74	59	51	—	3 5 8,5	16 23 39	—	—	1,67	1,44	—	0,80	0,68	—
	Couvert	2 essieux	80 - 100 et 120	9,290	2,720	25	63	27,5	23,5	19,5	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —	1,1	0,94	0,78	0,43	0,37	0,30
		2 bogies	80 - 100	15,500	2,605	40,5	102	58	50	—	3 5 11,8	16 21 39	— — —	— — —	1,43	1,23	—	0,56	0,49	—
SEMI-SPÉCIALISÉ	**À trémies**	2 essieux 2 bogies	80 - 100 80 - 100	— —	— —	— —	40 48,	28 58,5	24 50,5	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	0,70 1,21	0,60 1,05	— —
	Réfrigérant	2 essieux 2 bogies	100 80 - 100 et 120	10,574 15,610	2,600 2,560	27,5 39,9	51 75,9	24 54	20 46	— 38	— —	— —	— —	— —	0,87 1,35	0,72 1,15	— 0,95	0,47 0,71	0,39 0,60	— 0,50
	À toit ouvrant	2 essieux	80 - 100	10,090	2,620	26,4	60,0	26	22	—	—	—	—	—	0,98	0,83	—	0,43	0,36	—
		2 bogies	80 - 100	12,390	2,630	32,6	74,0	57,5	49,5	—	30 34 39 50	2 3 5 9	35 42 48 56	2 3 5 9	1,76	1,51	—	0,77	0,66	—
SPÉCIALISÉ	**Transport de produits sidérurgiques** — Tôles fines	2 bogies	80 - 100	10,77	2,74			60	52	—	2,70 5,40	24 33	—	—	—	—	—	—	—	—
	Transport de produits sidérurgiques — Coils chauds	2 bogies	80 - 100	10,000	2,79			59	51	—	1,5 3 5	20 25 32	2,10 4,50	30 58	—	—	—	—	—	—
	Transport de produits sidérurgiques — à capots télescopiques	2 bogies	80 - 100	10,150	2,43	—	—	60	52	—	Berc. milieu Berc. interne Berc. externe	38 22 30	2,60	45	—	—	—	—	—	—
	Citerne pour transport de produits pétroliers	2 essieux 2 bogies	80 - 100 80 - 100	— —	— —	— —	365 hl 840 hl	29 59	25 51	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —	— —
	Transport d'automobiles	3 essieux	100 120	26,200 25,660	3,110 3,110			Capacité : 16 voitures de long. max. 4 m (6, plancher supérieur ; 10, plancher inférieur)												
	Transport de transconteneurs	2 bogies	80 - 100 et 120	18,480	2,95	—	—	60	52,5	44,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

(1) Les vitesses autorisées, suivant l'équipement du wagon, sont { régime Ro : 80 km/h ; régime S : 100 km/h ; **régime SS : 120 km/h** } avec une masse totale sur rails par essieu de { Ro : 20 000 kg ; S : 18 000 kg ; **SS : 16 000 kg** }

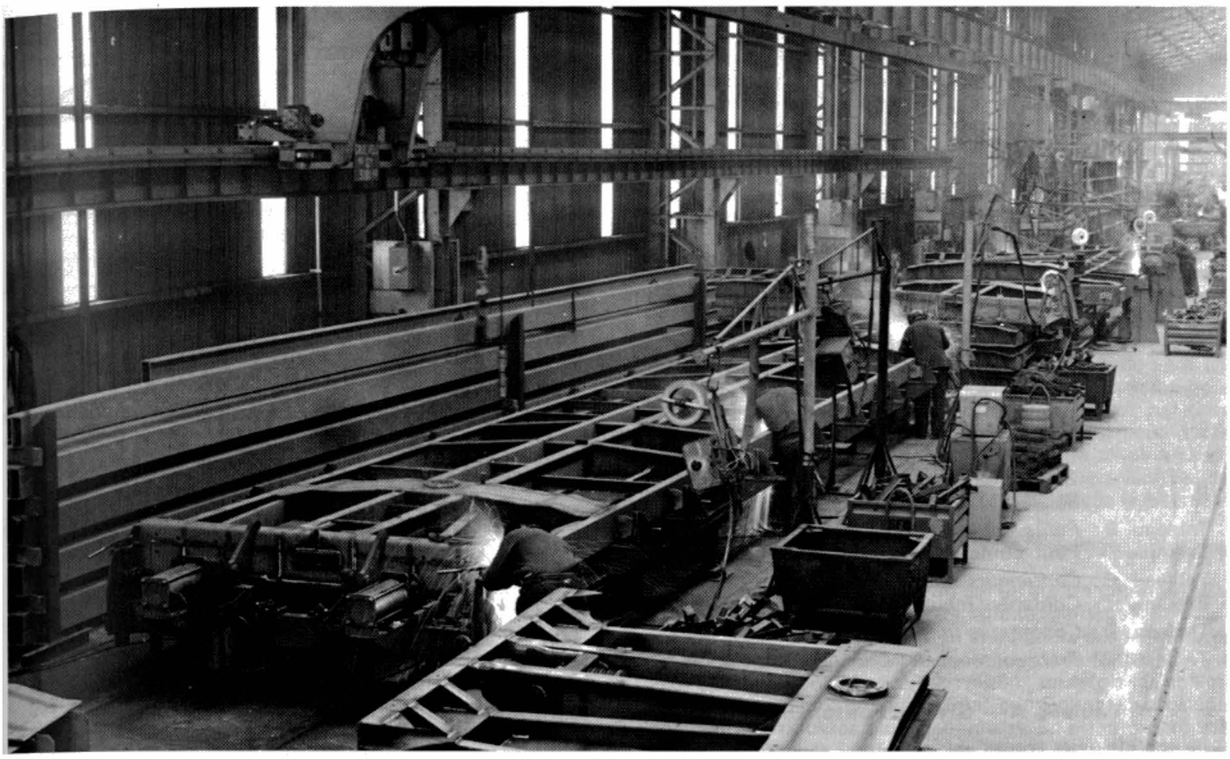


Fig. VI-75 — Chaîne de construction de châssis de wagons spécialisés à trémies, à 2 bogies (*Dumont-Arbel*)

— les *charges acceptées* (uniformément réparties et sur appuis)

— la *valeur* des deux *rapports :*

$$\frac{\text{charge maximale admissible}}{\text{surface utile}}$$

et :

$$\frac{\text{charge maximale admissible}}{\text{volume utile}}$$

qui qualifient l'intérêt commercial du type de wagon.

Toutes les administrations de Chemin de fer orientent leurs efforts, depuis 1968, vers :

— l'augmentation des vitesses commerciales, de manière à faire circuler le maximum de trains à 100 km/h, à réduire le temps d'immobilisation dans les triages, à rendre plus accessibles les chantiers de chargement et de déchargement dans les gares, tout en améliorant leur équipement en moyens modernes de manutention ;

— le remplacement progressif des wagons à deux essieux par du matériel à bogies, qui offre l'avantage d'une plus grande capacité de chargement, en poids, en longueur, en surface et en volume.

Les rapports charge sur surface $\left(\frac{C}{S}\right)$ et charge sur volume $\left(\frac{C}{V}\right)$ qui figurent dans le tableau ci-après, pour certains wagons, montrent les avantages qui peuvent en résulter pour les utilisateurs ; ces avantages seront plus grands encore à l'avenir, lorsque les valeurs limites admissibles de la « masse sur rails » seront majorées. En effet, les études entreprises en 1969, laissent espérer qu'elles passeront :

— en régime ordinaire, à 80 km/h : de 20 000 kg, par essieu, à 21 000 kg (et peut-être à 22 000 kg) ;

— en régime S, à 100 km/h : de 18 000 kg, par essieu, à 20 000 kg ;

— en régime SS, à 120 km/h : de 16 000 kg, par essieu, à 18 000 kg, tout d'abord puis, ultérieurement à 20 000 kg.

Il n'y aurait donc plus à l'avenir que deux régimes d'acheminement des marchandises : un régime ordinaire et un régime accéléré.

De plus, les réseaux se concertent pour aller vers une spécialisation de plus en plus poussée des wagons et des conteneurs (ou des transconteneurs) pour les rendre compatibles avec les moyens modernes de manutention et réduire ainsi les frais de main-d'œuvre des utilisateurs ; ils se groupent pour lancer des constructions en séries de plus en plus importantes, afin de diminuer le prix d'achat (fig. VI-75).

17. PROCESSUS SUIVI POUR L'ÉTUDE ET LA CONSTRUCTION DES CONTENEURS ET DES TRANSCONTENEURS

17.1. Recherche des formes et des dimensions

17.1.1. Dimensions et caractéristiques générales. Elles sont déterminées sur le plan international et les principales figurent sur les tableaux ci-après :

Tableau A : *Grands conteneurs*

Exemples : Grand conteneur fermé, catégorie 52 (fig. VI-76) ;

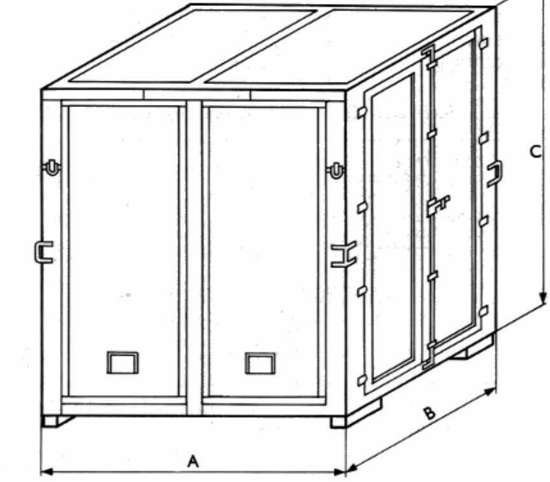


Fig. VI-76 — Grand conteneur de type courant, fermé, catégorie 52

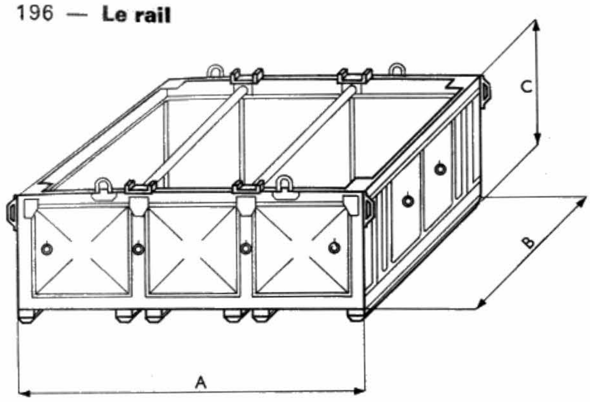


Fig. VI-77 — Grand conteneur de type courant ouvert, catégorie 71

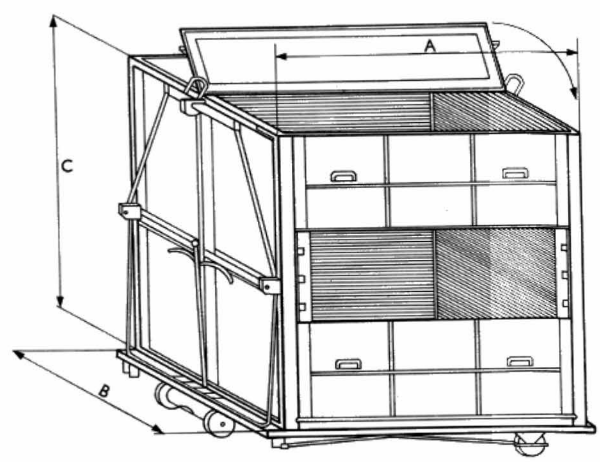


Fig. VI-78 — Petit conteneur de type courant, catégorie C

Grand conteneur ouvert, catégorie 71 (fig. VI-77) ;
Grand conteneur fermé, catégorie 72 (V. fig. VI-35).

Tableau B : *Petits conteneurs.*
Exemple : Petit conteneur, catégorie C (fig. VI-78) ;

Tableau C : *Conteneurs maritimes.*
Exemple : Conteneur maritime, catégorie 2 (fig. VI-79).

Tableau D : *Conteneurs universels.*

Tableau E : *Transconteneurs* (V. fig. VI-36).

Tableau A — Grands conteneurs

Ils sont de deux types :

— *ouvert*, répartis en quatre catégories ;

— *fermé*, répartis en cinq catégories.

Les conteneurs doivent avoir, au moins sur une de leurs parois, une ouverture munie de porte.

Type	Catégorie	Longueur maximale (mètres)	Largeur maximale (mètres)	Hauteur maximale (mètres)	Ouverture	
					Largeur (mètres)	Hauteur (mètres)
Ouvert	101	5,00	2,30	2,00	1,80	0,80
	71	3,50	2,30	2,00	1,80	0,80
	51	2,50	2,30	2,00	1,80	0,80
	31	1,50	2,30	2,00	0,70	0,80
Fermé	102	5,00	2,30	2,55	1,80	1,70
	72	3,50	2,30	2,55	1,80	1,70
	52	2,50	2,30	2,55	1,80	1,70
	32	1,50	2,30	2,55	0,70	1,70
	22	1,00	2,30	2,55	0,70	1,70

La *limite de charge* est telle que :

tare + charge maximale $\leqslant$ 5 200 kg

Une surcharge est admise pour les catégories 52 et 72 : tare + charge maximale $\leqslant$ 7 000 kg.

Tableau B — Petits conteneurs

Catégorie	Dimensions intérieures recommandées				Encombrement maximal		
	Volume (mètres cubes)	Longueur (mètres)	Largeur (mètres)	Hauteur (mètres)	Longueur (mètres)	Largeur (mètres)	Hauteur (mètres)
A	1	1,450	0,800	0,900	2,250	1,200	1,800
B	2	1,650	0,950	1,300	2,250	1,200	1,800
C	3	1,900	1,100	1,425	2,250	1,200	1,800

Une des parois longitudinales doit pouvoir s'ouvrir complètement (elle est démontable ou rabattable) ; le couvercle doit être relevable sur au moins un tiers de sa largeur, la partie relevable se trouvant du côté de la paroi ouvrante.

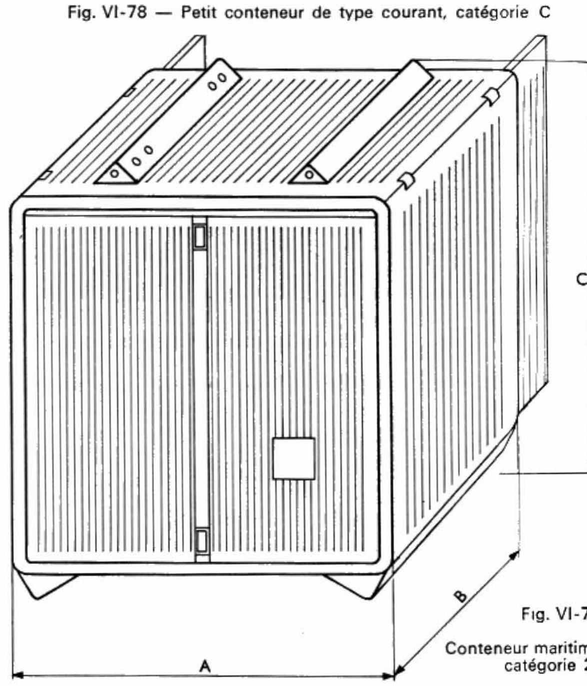


Fig. VI-79
Conteneur maritime catégorie 2

La *limite de charge* est telle que :

tare + charge maximale $\leqslant$ 1 500 kg

Tableau C — Conteneurs maritimes

Catégorie	Volume (mètres cubes)	Dimensions extérieures maximales		
		Longueur (mètres)	Largeur (mètres)	Hauteur (mètres)
1	10 max.	2,92	2,15	2,05
2	8	2,40	2,10	2,10
3	5	2,30	1,50	1,85
4	4	2,30	1,25	1,85

Ils sont tous du *type fermé*. La *limite de charge* est telle que :

tare + charge maximale $\leqslant$ 5 000 kg

Les catégories 1, 2 et 3 ont une ou plusieurs portes, dont une est située :

— sur l'une des faces correspondant à la largeur, pour les catégories 1 et 2,

— sur l'une des faces correspondant à la longueur, pour la catégorie 3 ;

La catégorie 4 a au moins deux portes dont une sur la face correspondant à la largeur, et l'autre sur la face correspondant à la longueur.

Tableau D — Conteneurs universels

Volume (mètres cubes)	Dimensions extérieures			Observations
	Longueur (mètres)	Largeur (mètres)	Hauteur (mètres)	
10	2,92	2,30 **x**	2,10	**x** : faces comportant au moins une porte
8	2,40	2,10 **x**	2,10	
5	2,30 **x**	1,45	2,10	

La *limite de charge* est telle que :

tare + charge maximale ⩽ 5 000 kg, en transport maritime ;
tare + charge maximale ⩽ 5 200 kg, en transport ferroviaire, sur wagon non spécialisé ;
tare + charge maximale ⩽ 6 300 kg, en transport ferroviaire, avec wagon porteur aménagé.

Tableau E — Transconteneurs

Catégorie	Longueur (mètres)	Largeur (mètres)	Hauteur (mètres)	Masse totale tare+charge maximale (kilogrammes)
10/4	2,991	2,438	1,214	10 000
10/8	2,991	2,438	2,438	10 000
20/4	6,058	2,438	1,214	20 000
20/8	6,058	2,438	2,438	20 000
30/4	9,125	2,438	1,214	25 000
30/8	9,125	2,438	2,438	25 000
40/4	12,192	2,438	1,214	30 000
40/8	12,192	2,438	2,438	30 000

Ils sont de deux types :

— *ouvert* ou *fermé*, avec une hauteur de 8 pieds soit 2,438 m ([1])

— *ouvert seulement*, avec une hauteur de 4 pieds soit 1,219 m répartis en deux groupes :

- les *transconteneurs ordinaires*,
- les *transconteneurs spéciaux* qui, à l'image des conteneurs et des wagons, peuvent être subdivisés en *semi-spécialisés* et *spécialisés*.

Les transconteneurs ordinaires fermés doivent avoir, au moins sur une de leurs parois de bout, une ouverture aussi grande que possible, munie de porte ; cette ouverture ne doit pas être inférieure à 2,13 m en hauteur et 2,20 m en largeur.

Des portes latérales, pour couvrir les transconteneurs restant sur le wagon porteur lors de chargement ou de déchargement, sont recommandées.

(1) Les transconteneurs *frigorifiques* (semi-spécialisés) peuvent avoir une hauteur maximale de 8 pieds, 6 pouces soit 2,590 m.

Le conteneur, en principe, ne comporte pas de dispositif d'amarrage sur le wagon ; il est muni de *quatre anneaux ou brides*, placés sur la partie supérieure, pour permettre sa manutention par câbles ou chaînes.

Le transconteneur comporte, à la partie inférieure, des pièces spéciales (dites *pièces de coin*) qui permettent son arrimage sur les wagons ou les véhicules routiers spécialement équipés pour son transport ; il comporte, en outre, les mêmes pièces aux quatre coins supérieurs, ce qui rend sa manutention possible, soit par le haut, soit par le bas.

17.1.2. Disposition et choix des membrures. — Les conteneurs (ou les transconteneurs) subissent des contraintes — très différentes de celles des wagons — qui résultent :

— des *efforts dus à la marchandise elle-même* (déformation des planchers et des parois latérales, action sur les portes), soit parce que celle-ci n'a pas de résistance propre (marchandise en vrac ou sous forme liquide), soit par suite des réactions en marche (déplacement ou tassement, après chocs, freinage trop brutal, trépidations), ou résultant tout simplement des oscillations verticales ou transversales de l'engin porteur ferroviaire ou — et c'est le cas le plus fréquent — routier) ;

— des *efforts de manutention* (levage, portage, roulage) ;

— du *stockage* (pose sur un sol ou sur un engin insuffisamment plat, ou manquant de rigidité, gerbage).

La recherche de la disposition et du choix des membrures du châssis, du plancher, des parois, et de la toiture, s'il y a lieu, s'effectue comme pour le wagon ; toutefois les sollicitations sont mieux définies et par conséquent, les calculs peuvent être poussés plus résolument. En effet, on connaît mieux les charges verticales, les efforts sur les parois, les réactions dues aux dispositifs d'arrimage (pièces de coin) ou de manutention (par les câbles obliques, les palonniers, les bras à becs des portiques qui permettent, à la fois, le levage et le déplacement horizontal).

On tient compte du fait que le transconteneur ne doit pas être soumis à une *accélération supérieure à* $2\,g$ ([2]) ; celle-ci se mesure horizontalement et longitudinalement, à la base, au voisinage des points de fixation sur le wagon de transport. Celui-ci reçoit des chocs qui lui donnent une accélération ou une décélération dépassant nettement cette valeur ; c'est pourquoi, si l'amarrage rend solidaire le wagon et le transconteneur (par ses pièces de coin) (V. fig. VI-58) ce dernier sera, ou bien muni d'un *plateau amortisseur,* ou bien acheminé en *trains-blocs,* sur wagons spécialisés (fig. VI-80), ce qui évite tout passage au triage. Au contraire, si l'amarrage est « souple », le transconteneur doit pouvoir glisser sur le plancher du wagon et réaliser ainsi un « auto-amortissement » par friction de ses pièces de coin inférieures, sur ce plancher.

Les conteneurs maritimes et universels doivent pouvoir être gerbés, chargés, par groupes de trois de même catégo-

(2) *g*, accélération terrestre est égale sensiblement à 10 m/s² (V. t. 1, Préliminaires).

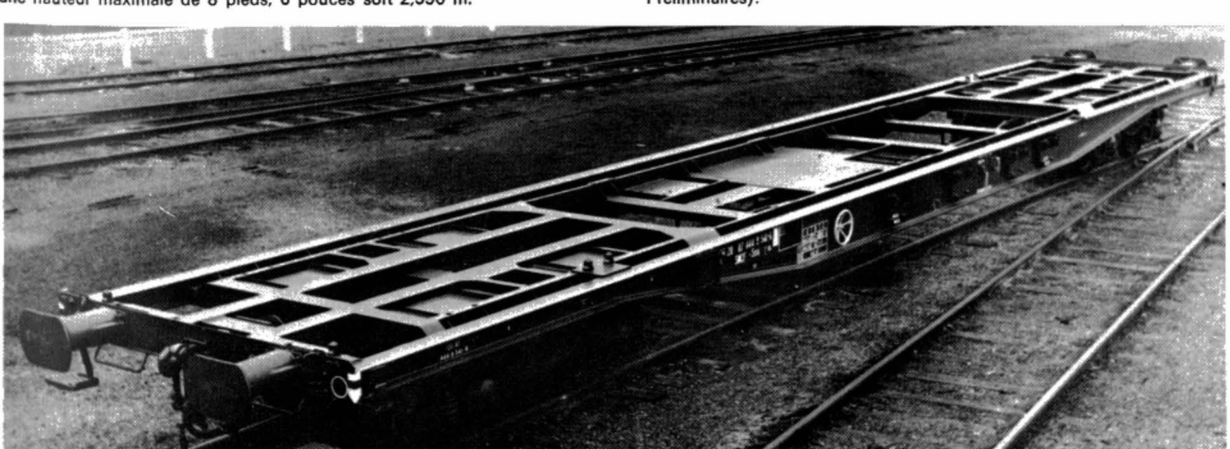


Fig. VI-80 — Wagon spécialisé à 2 bogies pour le transport en « trains-blocs » des transconteneurs de 10, 20, 30, 40 pieds de longueur et 8 pieds 6 pouces de hauteur maximale (*S.N.C.F.*)

rie. Les transconteneurs doivent pouvoir être gerbés, chargés au maximum, par groupes de six de même catégorie.

Du fait que tous ces engins sont essentiellement des emballages, leur tare doit toujours être la plus faible possible ; les études et les recherches de la meilleure fabrication doivent être conduites dans ce but et aussi pour mener au prix de revient le plus réduit possible.

17.1.3. Construction obligatoire d'un transconteneur prototype. — La construction d'un prototype est obligatoire ; elle permet l'obtention d'un « label » de qualité et l'« agrément » des réseaux de chemins de fer, à la suite d'essais, dont la nature et les résultats à obtenir ont été fixés par l'U.I.C. sur le plan international.

17.2. Essais des conteneurs et des transconteneurs prototypes

17.2.1. Conteneurs. — Les conteneurs chargés normalement doivent résister sans déformation permanente (rupture, arrachement, décollement), pendant leur manutention par soulèvement, aux efforts dus à l'obliquité des chaînes ou câbles de levage, accrochés aux quatre anneaux ou brides et faisant avec le plan horizontal, un angle de 30° ; cette valeur est portée à 45° pour les petits conteneurs avec une surcharge de 20 % ;

Le même essai est répété en n'utilisant que deux points d'accrochage, situés en diagonale.

Les conteneurs fermés, à parois pleines, doivent garantir les marchandises contre toute avarie de mouille.

Les conteneurs maritimes ou universels, pouvant être gerbés par groupes de trois, un conteneur doit donc pouvoir supporter deux autres conteneurs de même catégorie chargés au maximum.

17.2.2. Transconteneurs. — Les transconteneurs surchargés à 25 %, sont fixés à deux points d'ancrage, d'abord par les deux pièces de coin inférieures d'une extrémité, puis ensuite par les deux pièces de coin de l'autre extrémité, et soumis à une accélération égale à 2 g ; aucune déformation permanente ne doit être relevée.

— Chargés au double de leur charge normale, ils sont levés, par une action dirigée verticalement et agissant sur les quatre pièces de coin supérieures, puis, avec un angle de 30°, par les quatre pièces de coin inférieures ; aucune déformation, aucune anomalie ne doit être constatée. Pour les transconteneurs de la catégorie 10, on admet le levage par le haut et par le bas, avec des efforts dont la direction forme un angle de 30° avec la verticale.

— Les parois latérales et les portes sont également l'objet d'essais dynamiques ou statiques pour vérifier leur tenue et celle des charnières, des crémones et des verrous.

— La résistance du plancher est vérifiée à l'aide d'un chariot industriel, bien défini, se déplaçant dans le sens longitudinal, avec une charge telle que l'effort égale 2 700 daN par roue.

— Un essai d'étanchéité est exécuté sur tous les transconteneurs du type fermé, à l'aide d'un jet d'eau, la buse étant placée à 1,5 m de distance (pression 1 bar, orifice de 12,5 mm de diamètre) ; le jet est dirigé sur tous les joints des portes et sur toutes les liaisons du panneautage et des membrures.

— La possibilité du gerbage est vérifiée en plaçant l'un sur l'autre, six transconteneurs identiques, chargés à 1,8 fois le poids admissible ; le transconteneur inférieur ne doit présenter aucune anomalie ou déformation, le rendant inapte à l'emploi.

17.3. Exemples de réalisations. — En dehors des réalisations représentées par les figures VI-35 et VI-36 et parmi une variété de types très importante, il faut signaler ceux dont le nombre d'unités en service croît rapidement tels les transconteneurs semi-spécialisés, frigorifiques de 6 m environ (20 pieds ; fig. VI-81) et les conteneurs spécialisés pour produits chimiques liquides (V. hors-texte).

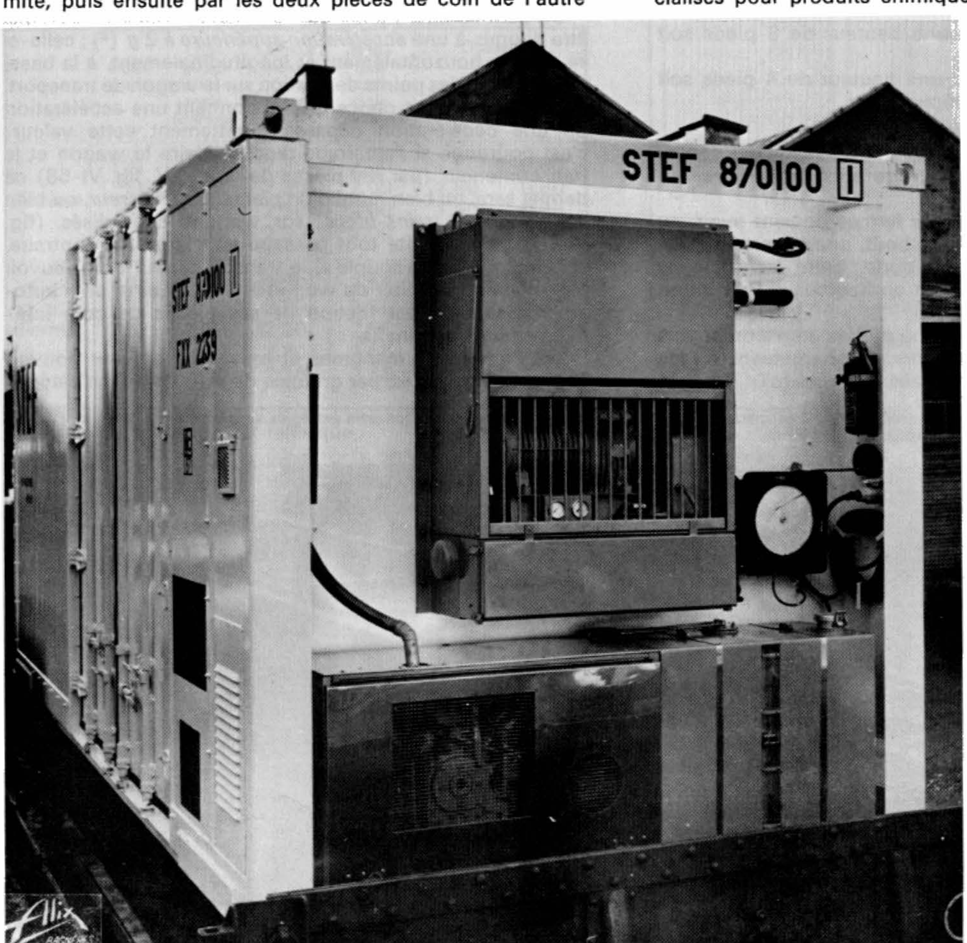


Fig. VI-81

Transconteneur spécialisé, frigorifique, de 6 m de longueur et de 2,58 m de hauteur ; caisse isolante à ossature métallique, parois en « sandwich » verre-polyester-mousse de polyuréthanne ; 1 ouverture par face latérale (L : 2,230 m ; h : 2,276 m) ; 1 ouverture à une extrémité (L : 2,150 m ; h. 2,276 m) ; volume utile : 23,5 m³ ; tare : 3 200 kg ; puissance de l'équipement frigorifique : 2 700 fg-h ; coefficient de transmission thermique global : k = 0,30
(Soulé)

CHAPITRE VII

ATTELAGE AUTOMATIQUE

1. GÉNÉRALITÉS

Les chemins de fer européens utilisent encore l'attelage à vis avec tampons latéraux pour relier entre eux les différents véhicules de leurs trains (locomotives et voitures pour voyageurs ou wagons pour marchandises).

Cet attelage à vis est placé dans l'axe du véhicule et à chacune des deux extrémités de celui-ci. Il est relié élastiquement au châssis par un ressort qui peut être constitué par un empilage de rondelles en caoutchouc conçu pour résister à de très fortes charges de traction. Quant aux tampons latéraux, placés sur les extrémités des châssis des véhicules, de part et d'autre de l'axe d'attelage, ils doivent amortir les chocs entre les wagons, lorsque ceux-ci sont manœuvrés dans les triages, et assurer un écartement souple entre les véhicules lorsque ceux-ci sont attelés entre eux pour former un train.

Cet attelage manuel exige, dans les triages, une main-d'œuvre nombreuse de plus en plus difficile à trouver. L'atteleur doit pénétrer entre les tampons des wagons pour mettre en place et visser l'attelage, manœuvre pénible et dangereuse, puisque les statistiques internationales montrent qu'il se produit quatre accidents mortels en moyenne par an et pour 100 000 agents.

Les possibilités normales de traction de cet attelage ne peuvent dépasser 30 000 daN (sa résistance à la rupture est de 85 000 daN) ; de ce fait les trains munis de l'attelage à vis ne peuvent remorquer des charges supérieures à 2 500 t, alors que l'attelage automatique permet la formation de trains beaucoup plus lourds, de 8 000 et 10 000 t. Telles sont en effet les charges atteintes par les grands trains de l'Amérique du Nord, où depuis 1893, l'utilisation de l'attelage automatique est obligatoire pour toutes les entreprises ferroviaires.

L'attelage utilisé en Amérique du Nord, le système *Janney*, est un attelage à griffe mobile permettant un effort de traction en service de 100 000 daN. Il est également généralisé au Canada, au Mexique, ainsi que sur de nombreux grands réseaux de l'Amérique du Sud. De plus, il est utilisé par la plupart des réseaux australiens et a été généralisé au Japon qui, en une seule journée (17 juillet 1925), a pu réaliser l'opération spectaculaire d'équiper la totalité de son parc (46 000 wagons).

En Europe, les chemins de fer de l'U.R.S.S. ont terminé l'application de l'attelage automatique en 1957. Le type utilisé, le *SA*3, est, contrairement à l'attelage *Janney*, un attelage à griffes fixes du type *Willison* (fig. VII-1). Sur la base des conditions de trafic existant en 1957, les chemins de fer de l'U.R.S.S. estiment avoir économisé ainsi journellement 7 000 heures de locomotives de manœuvre et 1 000 000 d'heures de wagons.

Tous ces attelages automatiques, ainsi utilisés sur une grande échelle par d'importantes administrations ferroviaires, ne permettent que l'accouplement mécanique de choc et de traction entre les véhicules ; la jonction des conduites d'air nécessaires à la commande des freins et celle éventuelle des canalisations électriques doivent toujours être réalisées manuellement.

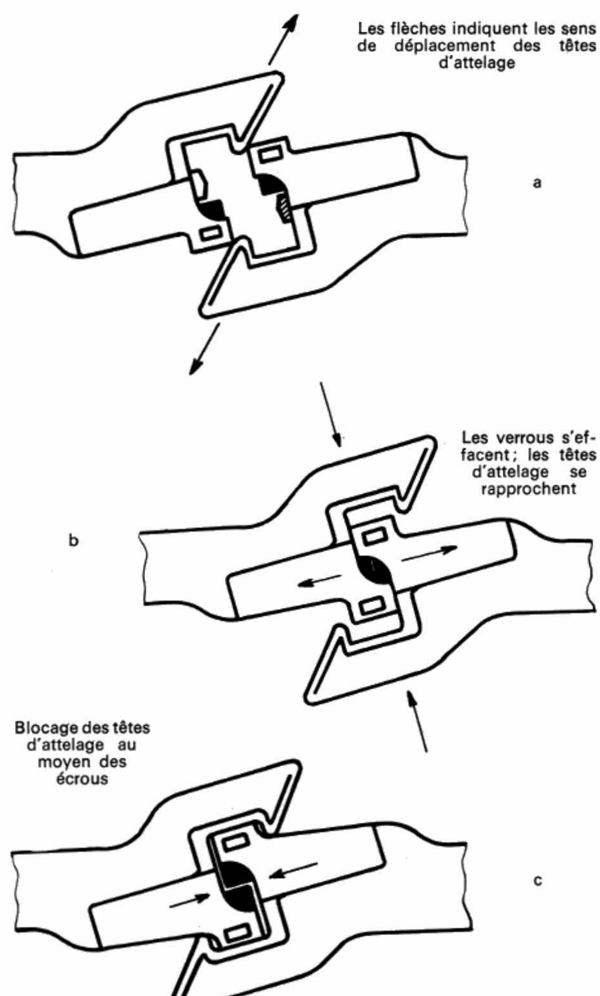


Fig. VII-1 — Fonctionnement, avec mise en place des verrous, de l'attelage à encastrement Willison dont le principe est retenu pour la réalisation de l'attelage automatique européen

La S.N.C.F. a déjà utilisé divers types d'attelages automatiques sur des trains assurant le trafic voyageurs dans des zones limitées. Les rames de longueurs variables desservant la banlieue parisienne se prêtaient particulièrement bien à cette application. Quelques-uns de ces attelages assurent également l'accouplement automatique des conduites d'air nécessaires au fonctionnement du frein pneumatique et également la continuité des circuits de commande électrique. Quelques rames de wagons de marchandises spécialisés dans le transport des camions et constituées de wagons surbaissés ont été également équipées.

2. APPLICATION DE L'ATTELAGE AUTOMATIQUE EN EUROPE

Les projets d'application en Europe de l'attelage automatique, recommandé dès 1923 par l'Organisation internationale du travail compte tenu du danger que présentait l'attelage à vis pour les travailleurs des chemins de fer, furent repris après la deuxième guerre mondiale. L'ampleur des dépenses à engager ne permit pas alors d'obtenir un accord des administrations ferroviaires sollicitées par des tâches plus urgentes de reconstruction.

Ce n'est qu'en décembre 1956 que l'Union internationale des chemins de fer (U.I.C.) examina à nouveau la possibilité de cette conversion. Un premier appel d'offres fut alors lancé, avec un cahier des charges qui prévoyait, en particulier, que l'attelage automatique européen devait être un attelage complet de choc et de traction, permettant la suppression des tampons latéraux, et qu'il devait réaliser l'accouplement automatique des conduites de frein et des canalisations électriques.

De plus, les administrations de chemins de fer des pays de l'est de l'Europe faisant partie de l'U.I.C., et qui se trouvent également groupées avec l'U.R.S.S. et les républiques populaires d'Asie dans une association ferroviaire appelée O.S.J.D., firent savoir qu'elles ne pouvaient choisir qu'un attelage automatique s'accouplant directement avec le coupleur *SA*3 des chemins de fer de l'U.R.S.S. Afin d'éviter toute coupure technique entre les pays de l'ouest et de l'est de l'Europe, l'U.I.C. décida, en 1961, que l'attelage automatique devrait être accouplable directement sans pièce intermédiaire avec l'attelage *SA*3.

Cette décision conduit à ne retenir, parmi les propositions faites par les firmes mondiales, que celles utilisant le profil à encastrement type *Willison*, imaginé par une firme américaine en 1920. Cet attelage, inventé trop tard pour être adopté par les chemins de fer américains, est en service non seulement sur les chemins de fer de l'U.R.S.S. mais aussi sur de nombreux chemins de fer industriels ou miniers d'Europe et d'Afrique.

Le nouveau cahier des charges commun pour l'U.I.C. et l'O.S.J.D. prévoit notamment :

— L'attelage automatique sera du même type pour tous les véhicules (locomotives, voitures, wagons, etc.).

— Il sera directement accouplable avec le coupleur *SA*3 des chemins de fer de l'U.R.S.S.

— Au cours de l'accouplement, le verrouillage sera automatique.

— La commande pour désaccoupler les attelages sera placée à l'extérieur des véhicules.

— Il devra être possible de pousser les véhicules sans provoquer l'accouplement des attelages.

— Les champs d'action horizontaux et verticaux fixés respectivement à 220 mm et 140 mm devront permettre l'accouplement des wagons en courbe de 135 m de rayon, les wagons présentant les différences maximales admises pour les hauteurs d'attelage.

— Les véhicules accouplés devront pouvoir circuler sur les bosses de gravité, les rampes de ferry-boat et dans les courbes de faibles rayons.

— L'attelage présentera une résistance de 150 000 daN à la traction et 200 000 daN en compression.

— L'accouplement complémentaire de deux conduites d'air comprimé de 1 1/4 inches (environ 32 mm) de diamètre et de canalisations électriques devra être possible.

— L'attelage automatique définitif sera monté en *choc et traction* et permettra ainsi le service des trains sans tampons latéraux.

Un programme d'essais extrêmement poussés a été mis en œuvre par l'O.R.E. (Office de recherches et d'essais de l'U.I.C.), tant sur plateaux d'essais qu'en ligne avec des rames de compositions diverses. Ils ont permis de définir un attelage automatique de *synthèse* reprenant les parties techniquement les meilleures dans chacune des formules proposées.

L'attelage U.I.C. est maintenant défini et, en 1970, il a été rendu accouplable avec l'attelage mis au point parallèlement par les experts de l'O.S.J.D.

La Conférence européenne des ministres des transports (C.E.M.T.), au vu d'un rapport complet présenté par l'U.I.C. a, en juin 1970, recommandé l'application de l'attelage automatique sur les chemins de fer européens à partir d'avril 1979.

Après complément d'études, l'U.I.C., en juin 1973, a décidé formellement l'introduction de l'attelage automatique dans les réseaux européens membres de son organisation, en proposant une application rapide commençant en 1985.

3. DESCRIPTION DE L'ATTELAGE AUTOMATIQUE RETENU POUR LES CHEMINS DE FER EUROPÉENS

L'attelage mis au point par les chemins de fer de l'U.I.C., et rendu accouplable avec l'attelage semblable de l'O.S.J.D., fait l'objet de la figure VII-2. Il comprend les principaux éléments suivants.

3.1. La tête d'attelage (V. fig. VII-2). — La tête d'attelage *T* est prolongée par le bras d'attelage *Tb* et est munie à la partie inférieure d'une corne de centrage et de rigidification *Tr*.

Au moment de l'accostage, les deux profils s'emboîtent mutuellement en alignant les têtes sur un même axe horizontal et vertical (V. fig. VII-1 a).

Le verrouillage des têtes accouplées est réalisé au moyen d'un verrou *Tv* qui pivote sur un axe horizontal placé à la partie inférieure de la tête.

Lors de l'emboîtement des profils, les verrous se repoussent mutuellement en s'effaçant partiellement à l'intérieur des têtes (V. fig. VII-1 b) ; à la fin du mouvement, ces verrous retombent vers l'avant et bloquent ainsi l'assemblage des deux têtes (V. fig. VII-1 c).

De la face frontale intérieure du profil dépasse également un contre-verrou *Tc* (*lockset*) articulé dans la tête d'attelage. Dès que le contre-verrou est repoussé par l'attelage opposé, il actionne un cliquet de blocage qui empêche tout mouvement de recul du verrou. Un désaccouplement intempestif des attelages est donc impossible.

Pour désaccoupler, on efface vers l'arrière, à l'aide du levier de la commande, le verrou de l'un quelconque des attelages en présence. Dès la séparation des têtes, les contre-verrous sont libérés et les verrous des deux têtes retombent automatiquement en position *prêt à l'accouplement*.

Le système de verrouillage peut également être disposé pour que, après séparation des véhicules, l'attelage soit dans l'impossibilité de se réaccoupler. De plus, il permet d'annuler une manœuvre erronée de désaccouplement sans avoir à séparer les véhicules.

Dans l'ensemble, le mécanisme de verrouillage se compose d'un nombre restreint de pièces non usinées.

3.2. La suspension (V. fig. VII-2). — La suspension *S* supporte la tête d'attelage et permet au bras d'attelage de prendre toutes les inclinaisons horizontales (± 20°) et verticales (± 11°) nécessitées par l'accouplement rigide des attelages.

La suspension dite *à traverse* choisie par l'U.I.C. a été comparée avec une suspension dite *à béquille* proposée par l'O.S.J.D.

Les deux organisations n'ayant pu s'arrêter sur une solution unifiée, il a été décidé d'admettre les deux types de

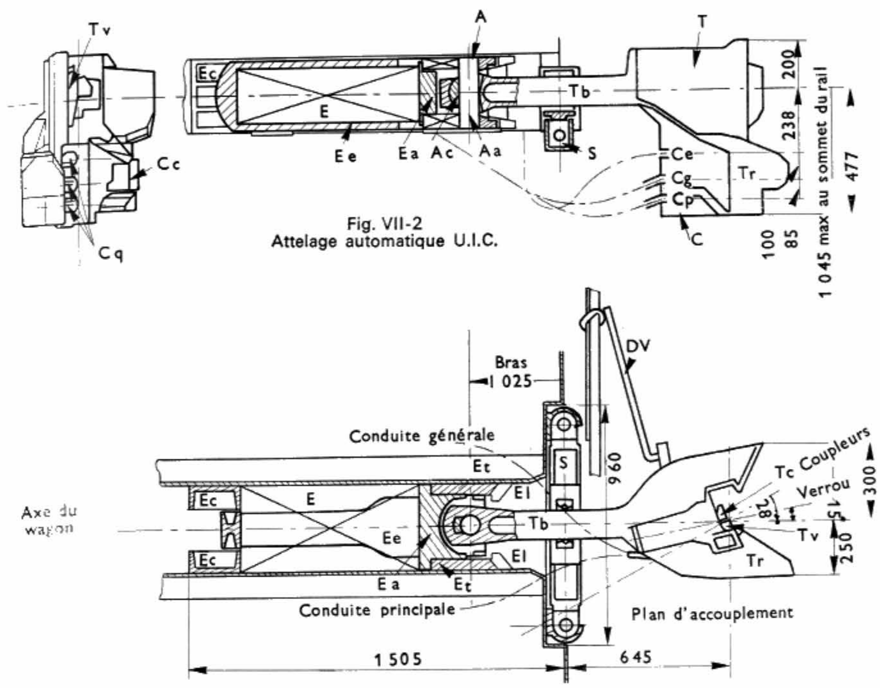


Fig. VII-2
Attelage automatique U.I.C.

T: tête d'attelage; Tb: bras d'attelage; Tr: corne de centrage et de rigidification; Tv: verrou; Tc: contre-verrou; S: suspension; C: coupleurs de conduite; Cc: came de commande; Ce: coupleur électrique; Cg: coupleur de la conduite générale de frein; Cp: coupleur de la conduite principale de frein; Cq: couvercle de protection; A: articulation; Aa: axe vertical de liaison; Ac: coussinet sphérique de traction; E: dispositif élastique; Ea: plaque de pousse; Ec: butées de choc; Et: butées de traction; Ee: étrier de montage; El: butées de limitation de course en traction; DV: commande de déverrouillage

suspension en trafic international, sous le nom de *suspension U.I.C./O.S.J.D. variante* 1 (à traverse) et *variante* 2 (à béquille).

3.2.1. La suspension à traverse (fig. VII-3). — Elle comporte une traverse (1) qui repose par l'intermédiaire de deux jeux de ressorts verticaux (3) dans deux lanternes (5) fixées aux extrémités du châssis du wagon.

La traverse (1) porte un chariot (2) coulissant latéralement. Ce chariot (2) se compose de l'étrier de rappel (2 a) construit dans sa partie supérieure en forme de fourche pour le guidage du bras d'attelage (6) et de l'étrier débrayable (2 b).

En service normal, l'étrier débrayable (2 b) est maintenu en position fixe dans la traverse à l'aide du doigt (4 c); dans ces conditions, le ressort horizontal précontraint (2 c) assure le rappel en position médiane de l'étrier à fourche (2 a) et, par conséquent, du bras d'attelage (6).

En actionnant le levier (4), on libère l'étrier débrayable (2 b), ce qui annule l'action du ressort de rappel horizontal (2 c). Dès lors, l'attelage peut être orienté à la main (par un seul agent) dans n'importe quelle position, où il demeure stable.

L'arbre de commande du dispositif de débrayage se termine par deux poignées, aisément accessibles, de chaque côté de la tête d'attelage.

Lorsqu'on a fait usage du dispositif de débrayage, l'étrier débrayable se réenclenche automatiquement pendant la marche dès que l'attelage repasse par la position de centrage.

La suspension *à traverse* est de construction simple et robuste; elle présente un encombrement très restreint, étant pratiquement incorporée aux traverses extrêmes des châssis de wagons.

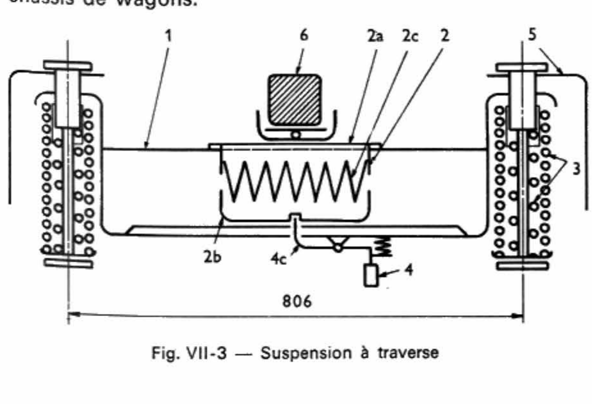


Fig. VII-3 — Suspension à traverse

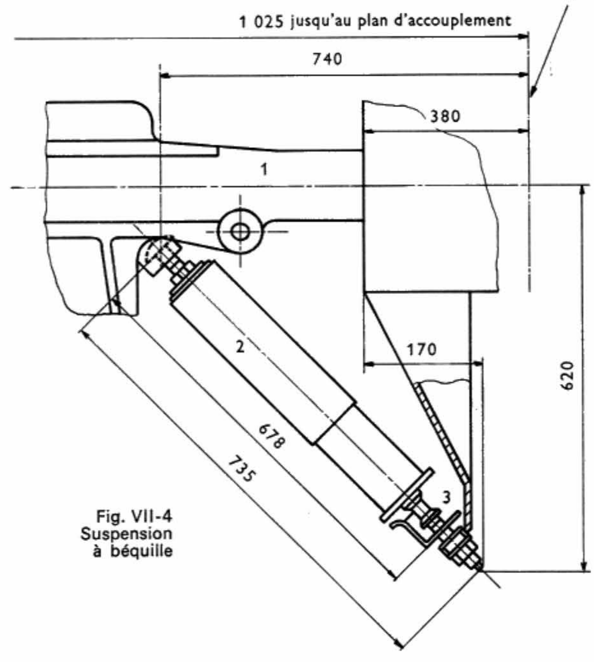


Fig. VII-4
Suspension
à béquille

3.2.2. La suspension à béquille (fig. VII-4). — Elle est basée sur un principe différent. Le bras d'attelage (1) s'appuie sur une béquille télescopique à ressort (2), inclinée d'environ 45° vers la tête d'attelage.

Cette béquille s'appuie en deux points (3) d'un support fixé aux châssis des wagons et sous les traverses extrêmes de ceux-ci.

L'appui écarté de la béquille par deux points assure le rappel du bras d'attelage en position médiane.

La suspension *à béquille* peut être également munie du dispositif de débrayage du rappel latéral.

3.3. Le coupleur de conduites pneumatiques et de canalisations électriques (V. fig. VII-2). — Le coupleur de conduites *C* est logé dans la partie inférieure de la tête. Il comporte trois canons: deux pour les coupleurs pneumatiques (conduite générale *Cg* et conduite principale *Cp*) et un pour le coupleur électrique *Ce* (auquel on peut raccorder un câble à sept conducteurs).

Afin d'assurer notamment une bonne étanchéité des conduites d'air malgré les déplacements relatifs dus au jeu entre têtes accouplées, les coupleurs sont reliés élastiquement à la tête d'attelage.

Lorsque l'attelage est désaccouplé, le coupleur de conduites est en position de retrait. L'embouchure des conduites d'air et les contacts électriques sont protégés par des couvercles.

Vers la fin du processus d'accouplement, la came de commande *Cc* articulée, disposée à l'intérieur de la poche de rigidification, est repoussée par la corne de l'attelage opposé ; dès lors les couvercles de protection *Cq* s'ouvrent et le coupleur se déplace vers l'avant pour entrer en contact avec le coupleur opposé. La cage du coupleur est munie de griffes pour assurer le centrage.

En cas d'accouplement avec un attelage *SA*3 qui ne comporte pas de corne de rigidification, la came de commande de l'attelage U.I.C. n'est pas mise en mouvement. Le coupleur de conduites demeure donc en position de retrait, ce qui évite toute interférence avec l'attelage libre lors de son débattement vertical, et les couvercles de protection restent fermés.

L'étanchéité des coupleurs pneumatiques est réalisée au moyen de joints à surface frontale étroite, insensibles à la glace et à la boue. Ces joints peuvent facilement être remplacés sans avoir à séparer les têtes d'attelage accouplées, en retirant les coupleurs par l'arrière.

3.4. L'articulation (V. fig. VII-2). — L'articulation *A* doit permettre la rotation du bras d'attelage de $\pm$ 20° dans le plan horizontal et $\pm$ 11° dans le plan vertical.

L'articulation U.I.C. comporte un tourillon à axe vertical (*Aa*) avec coussinet à appui sphérique (*Ac*) qui transmet les efforts de traction.

La surface de contact de la plaque d'appui sur laquelle l'extrémité du bras d'attelage exerce sa poussée est de forme cylindrique pour permettre la rotation de l'extrémité du bras dans le plan horizontal autour de l'axe du tourillon. Dans le plan vertical, la surface d'extrémité du bras présente une courbure appropriée : forme cylindrique, avec axe horizontal placé dans le plan d'accouplement des attelages. Ainsi, lorsque les bras d'attelages accouplés prennent une certaine angulation verticale pour compenser la dénivellation entre deux véhicules adjacents, la droite reliant les points de contact des bras sur les plaques d'appui reste parallèle à l'axe horizontal des véhicules (fig. VII-5).

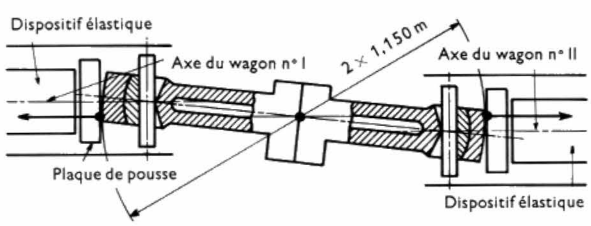


Fig. VII-5 — Contrôle d'alignement vertical

Cette disposition, connue sous le nom de *contrôle d'alignement vertical*, a pour but d'annuler (abstraction faite des frottements) la composante verticale des efforts de compression transmis par les attelages sur les véhicules et, par conséquent, d'améliorer la stabilité de ces derniers sous l'effet des efforts de pousse ou des réactions longitudinales de compression dans les trains.

3.5. Le dispositif élastique (V. fig. VII-2, *E*). — L'U.I.C. a décidé de ne pas imposer un type déterminé de dispositif élastique mais d'en préciser les caractéristiques mécaniques, l'encombrement maximal et les conditions de montage sur les véhicules.

Les caractéristiques suivantes ont notamment été prévues sous effort de compression :

- *Statique* (*essai à la presse*) :

— Précompression : 2 000 à 4 000 daN.

— Effort maximal pour une course maximale de 110 mm : 200 000 daN.

- *Dynamique* (*essais de tamponnement*) :

— Énergie minimale emmagasinée : 60 000 J.

— Énergie absorbée : 60 % au moins de l'énergie emmagasinée.

Le dispositif élastique est monté *en choc et traction* selon des principes éprouvés aux États-Unis d'Amérique et en U.R.S.S.

Il transmet les efforts de compression (appliqués sur la plaque de pousse *Ea* par l'extrémité du bras d'attelage) sur les *butées de choc Ec* adaptées aux longrines centrales du châssis, à l'arrière du dispositif. L'emplacement de ces butées peut varier selon la longueur du dispositif choisi.

Il transmet les efforts de traction (appliqués sur l'étrier *Ee* par l'axe d'articulation) sur les *butées de traction Et* adaptées aux longrines centrales du châssis, à l'avant du dispositif, butées dont l'emplacement est fixe. Des butées complémentaires *El* limitent la course du dispositif élastique, en traction, à 50 mm (correspondant à un effort final proche de 70 000 daN).

Différentes firmes spécialisées ont mis au point des dispositifs élastiques répondant à l'ensemble des conditions demandées. Ces dispositifs élastiques peuvent se classer en :

— Appareils à friction par coins ou ressorts-bagues.
— Appareils en caoutchouc.
— Appareils hydrauliques.
— Appareils en élastomères.

3.6. Les organes de commande de déverrouillage (V. fig. VII-2, DV). — Pour la manœuvre du système de déverrouillage, l'U.I.C. a choisi une construction simple et robuste, inspirée du type américain.

L'arbre de commande, disposé transversalement devant et au bas de la traverse de tête du wagon, se termine de chaque côté du wagon par une poignée d'accès facile et sans danger, dite *levier de commande* (de déverrouillage).

En position de repos (attelage *prêt à l'accouplement* ou *attelage accouplé*), le levier est dirigé vers le bas avec une inclinaison de 15° sur la verticale (fig. VII-6).

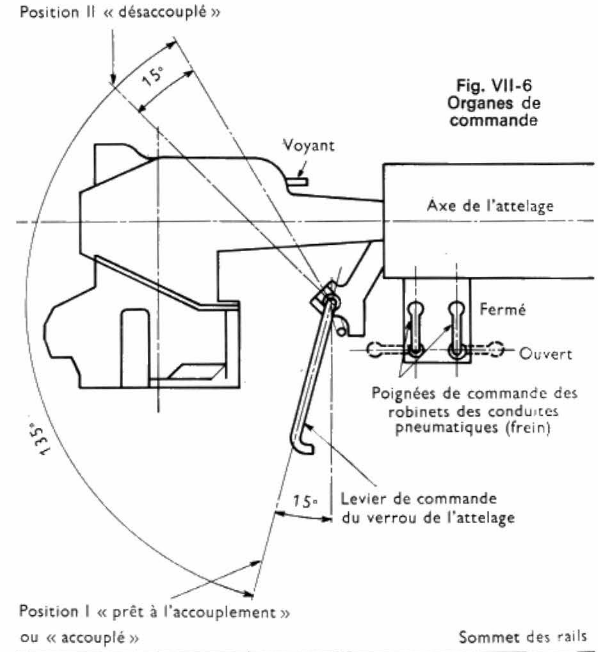
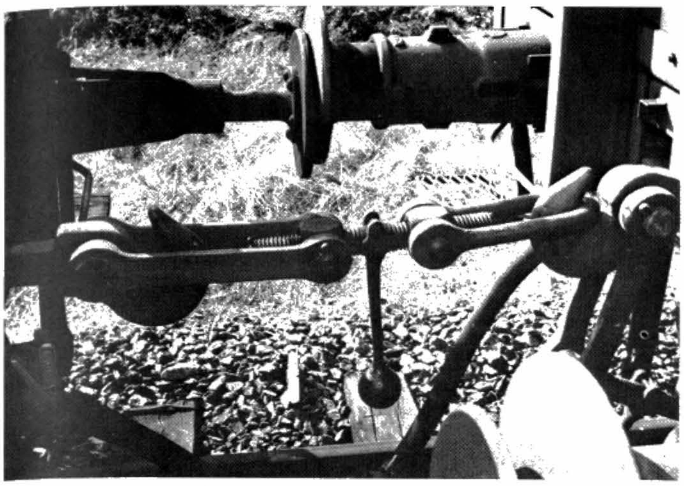


Fig. VII-6 Organes de commande

Toutes les opérations demandées peuvent s'effectuer en manœuvrant le levier avec une seule main, indifféremment de l'un ou de l'autre côté du wagon.

Pour désaccoupler deux attelages, on soulève le levier de la position de repos (I) à la position haute (II) sur un quelconque des véhicules en présence, ce qui a pour effet d'effacer le verrou de l'attelage correspondant. Le levier reste en position haute (II) *attelage déverrouillé*, jusqu'au moment où les têtes se séparent et se remettent en position *prêt à l'accouplement*.



Attelage à vis (*S.N.C.F.*)

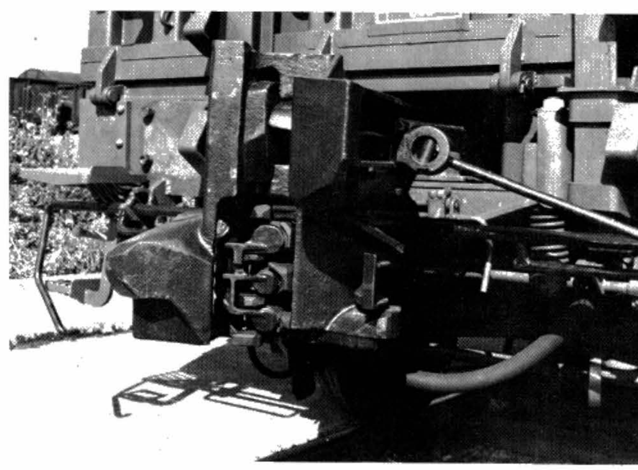


Attelage automatique à griffe mobile Janney, qui équipe tout le parc de wagons des États-Unis d'Amérique (*Santa-Fé — S.N.C.F.*)

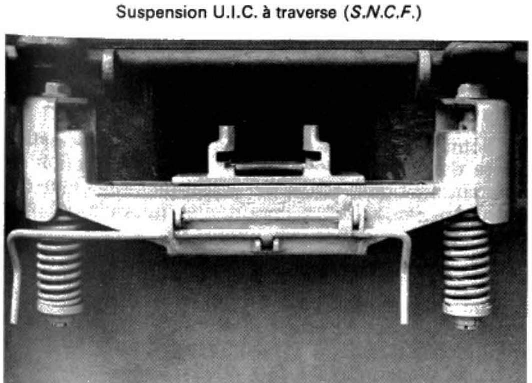


Attelage automatique Willison sur train de banlieue parisienne (*S.N.C.F.*)

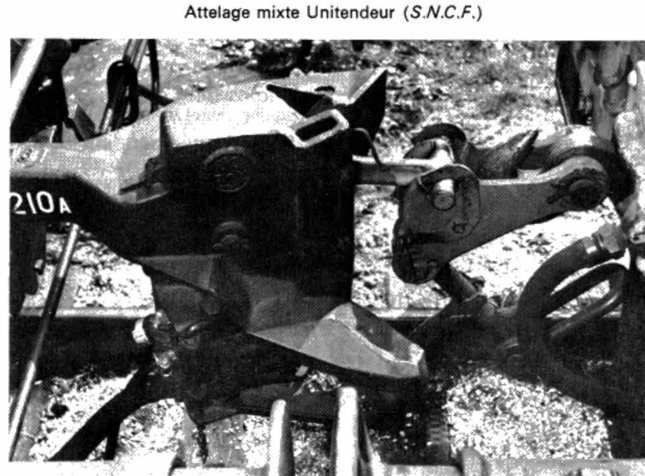
Attelage automatique U.I.C. 1969 (*S.N.C.F.*)



Suspension U.I.C. à traverse (*S.N.C.F.*)



Attelage mixte Unitendeur (*S.N.C.F.*)



4. MONTAGE DE L'ATTELAGE AUTOMATIQUE SUR LES VÉHICULES

Selon le type d'attelage, la construction du matériel roulant est différente. Dans le cas d'un wagon ordinaire, l'attelage à vis provoque un simple effet de traction sur la partie centrale du châssis, les tampons latéraux transmettant les chocs aux longerons latéraux qui doivent être renforcés (fig. VII-7).

Avec l'attelage automatique de choc et traction européen, la partie centrale du wagon démuni de tampons latéraux absorbe la totalité des efforts et doit être aménagée en conséquence, les longerons pouvant au contraire être allégés (fig. VII-8).

Des wagons de type ancien pourront avoir leur châssis renforcé afin de reporter les efforts centraux de traction et de choc transmis par l'attelage automatique sur les longerons latéraux (fig. VII-9).

Il avait été également envisagé de monter, sur les wagons anciens et pendant la période transitoire (avec maintien des tampons latéraux), l'attelage automatique en *seule traction* (fig. VII-10). Cette possibilité a été abandonnée, un bilan économique ayant montré le peu d'intérêt de cette solution.

À la suite des premières études faites par l'O.R.E., tous les wagons construits depuis le 1er janvier 1965 ont leur châssis apte à recevoir sans modifications le nouvel attelage automatique U.I.C.

Une fabrication de châssis de wagons selon la figure VII-8 ne pourra être envisagée qu'après application de l'attelage automatique et suppression des tampons latéraux.

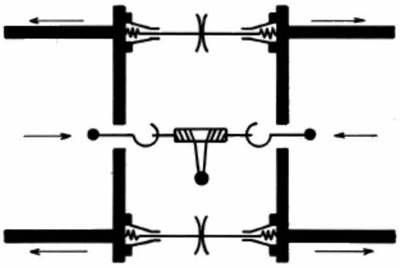


Fig. VII-7

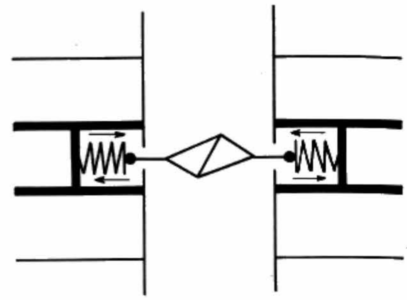


Fig. VII-8

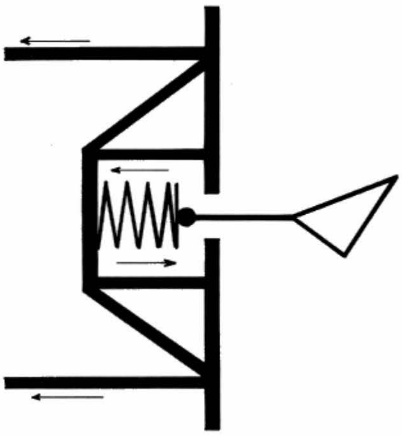


Fig. VII-9

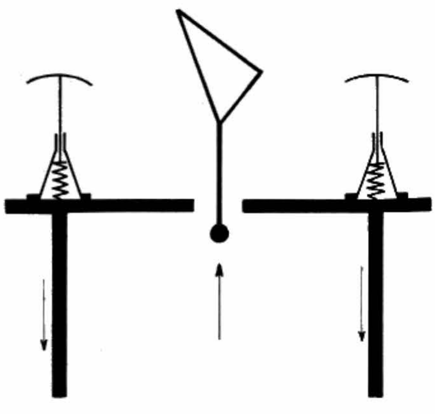


Fig. VII-10

5. APPLICATION DE L'ATTELAGE AUTOMATIQUE

Cette application peut être simultanée, progressive ou mixte.

L'application simultanée est la méthode utilisée en 1925 par les Chemins de fer japonais qui, le même jour, transformèrent l'ensemble de leur matériel pour passer de l'attelage à vis à l'attelage automatique. Cette méthode apporte le minimum de sujétion aux services de l'exploitation mais demande une préparation de plusieurs années pendant lesquelles il faut adapter le matériel roulant et stocker le matériel nécessaire.

L'application progressive permettrait d'équiper le matériel roulant avec le minimum de dépense mais apporterait plus de gêne aux services de l'exploitation, tout au moins dans les premiers mois ou les premières années.

Compte tenu des sujétions particulières à chacune des administrations, une application simultanée sur une part importante du matériel, complétée et terminée par une application progressive, permettra sans doute l'application de l'attelage automatique dans les conditions optimales.

Il s'agit, dans un premier temps, d'une application simultanée partielle suffisante pour assurer tous les échanges internationaux (sur 40, 50 ou 60 % du matériel), préparée quelques années à l'avance pour être réalisée au cours d'une période identique pour toutes les administrations (période de une à quatre semaines choisie pour son faible trafic). Dans un deuxième temps, sera réalisée une application progressive, de durée plus ou moins longue, sur le matériel restant.

Si l'on prévoit une période plus ou moins longue pendant laquelle attelage automatique et attelage à vis doivent être utilisés simultanément, encore faut-il que l'accouplement entre attelage automatique et attelage à vis soit possible. De nombreux appareils ont été essayés. L'*Unitendeur*, appareil proposé par la S.N.C.F., a été reconnu acceptable par les experts internationaux.

De même, l'utilisation provisoire d'un accouplement mixte pneumatique devra être envisagée pendant cette période transitoire.

La recommandation faite en 1970 par la C.E.M.T., complétée par la décision formelle d'application prise par l'U.I.C. en juin 1973, va donc permettre aux deux organisations (U.I.C. et O.S.J.D.) de fixer les conditions d'applications de l'attelage automatique sur l'ensemble des chemins de fer européens.

Nous sommes donc à la veille d'une transformation importante des chemins de fer. En effet, l'application de l'attelage automatique est, avec l'électrification, l'un des perfectionnements les plus importants qui puissent être apportés aux chemins de fer européens. Elle permettra une augmentation importante de la charge des trains, une meilleure rentabilité du matériel par une rotation plus rapide, une automatisation complète des opérations de triage et une économie importante dans les charges de personnel, compte tenu de la suppression des *atteleurs*.

De plus, la disparition de ce métier d'*atteleur* éliminera pour l'homme un travail pénible et non sans danger.

CHAPITRE VIII

FREINAGE DES TRAINS

1. CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LE FREINAGE DES TRAINS

Les problèmes posés par le freinage des véhicules ferroviaires sont caractérisés par l'importance des masses et des vitesses mises en jeu. De plus, il y a obligation impérieuse d'assurer l'arrêt des convois de façon certaine et, quelles que soient les conditions atmosphériques, sur une distance maximale fixe déterminée par l'implantation des signaux.

À titre d'exemple, l'énergie cinétique d'un train de 800 t circulant à 160 km/h s'élève à 790 000 kJ ; lors d'un arrêt d'urgence, ils devront être absorbés par le système de freinage et transformés à peu près intégralement en énergie calorifique en 1 mn environ.

Pour y parvenir, le plus couramment on utilise le freinage sur les essieux : l'effort retardateur s'exerce par l'intermédiaire du contact roue-rail et, de ce fait, l'effort de freinage est limité par les conditions d'adhérence rencontrées.

Aux grandes vitesses, les efforts de freinage engendrés par le frottement entre solides, trouvent une autre limite : celle qui résulte de la fusion ou de la destruction des matériaux de frottement par suite des effets thermiques dus à la transformation de l'énergie cinétique en chaleur.

Parmi les différents moyens utilisés pour freiner les trains, les freins mécaniques sont de loin les plus répandus. Ils font généralement intervenir le frottement, soit directement sur la roue (frein à sabots), soit sur des organes spécialement conçus à cet effet (frein à disques), soit aussi, dans quelques cas particuliers, sur les rails (frein magnétique).

D'autres freins, dits dynamiques, transforment l'énergie cinétique en chaleur, autrement que par frottement solide, en faisant intervenir un autre processus de transformation : c'est le cas du freinage électrique appliqué sur les locomotives ou automotrices électriques (moteurs fonctionnant en génératrices). C'est aussi le cas des freins à courants de Foucault, dont l'application au chemin de fer est actuellement encore du domaine expérimental et qui peuvent être conçus soit sous forme de frein rotatifs, (du genre ralentisseurs équipant les véhicules routiers de fort tonnage), soit sous forme de freins linéaires, développant les courants de Foucault dans le rail grâce à des patins alimentés en énergie électrique et situés à quelques millimètres au-dessus des rails.

Il faut remarquer que les freins dynamiques ne permettent généralement pas d'obtenir l'arrêt complet et qu'ils doivent être associés à un frein à frottement solide.

2. FREINS CLASSIQUES DES CHEMINS DE FER

Le freinage des véhicules ferroviaires a longtemps été obtenu à peu près exclusivement par l'application de sabots en fonte (fig. VIII-1) sur la surface de roulement en acier des roues. Ce procédé très simple permet déjà d'atteindre

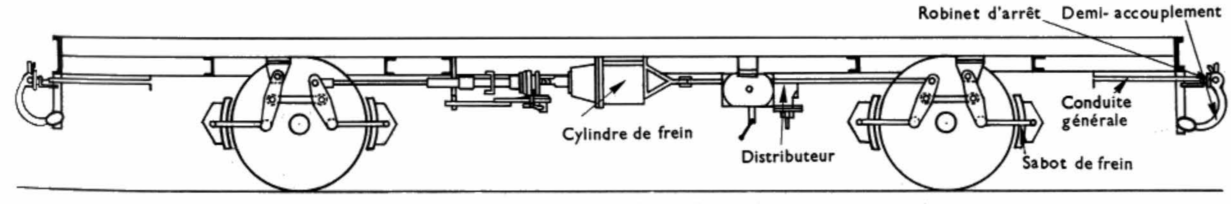
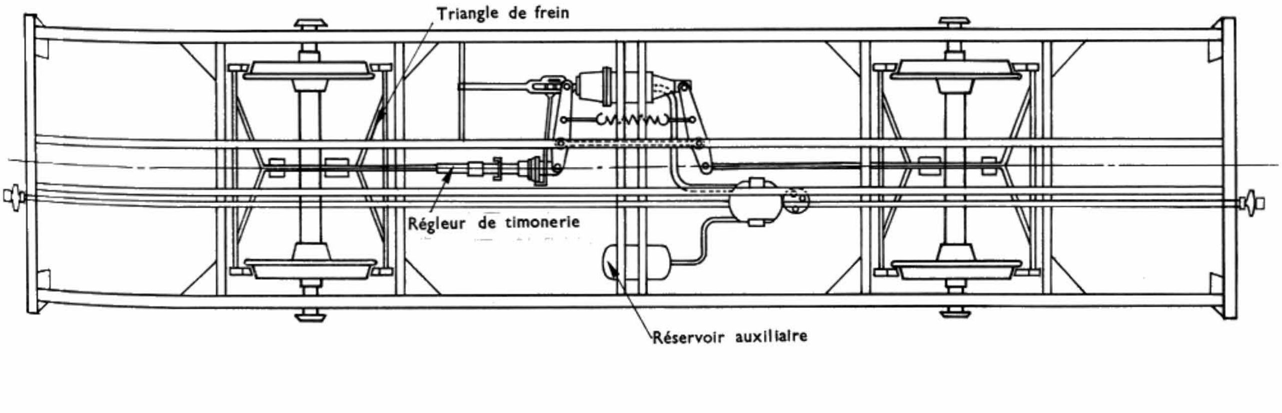


Fig. VIII-1 — Frein automatique à air comprimé, à semelles de fonte; équipement d'un wagon



un niveau de performance élevé : par exemple, freinage de trains à 200 km/h, à condition que la charge par essieu reste modérée (10 à 12 t). Il possède un ensemble de propriétés très intéressantes : la fonte est un matériau peu coûteux, facile à élaborer et le freinage ainsi obtenu est à peu près insensible aux conditions atmosphériques. Toutefois, les caractéristiques de frottement de la fonte sur l'acier des bandages sont assez particulières : des recherches ont été faites depuis de nombreuses années pour déterminer la valeur et les variations de son coefficient de frottement sur l'acier, en fonction de divers facteurs qui l'influencent. Dès 1878, Douglas Galton, en Angleterre, dégagea les principales lois de ce type de frottement. Plus récemment, vers 1930, Metzkow en Allemagne et, en 1936, Pedelucq en France exécutèrent des essais qui montrèrent que dans le cas d'un freinage d'arrêt exécuté avec un effort constant aux sabots, le coefficient de frottement F_e conserve une valeur sensiblement constante et assez faible depuis le moment où l'effort de freinage est établi jusqu'à celui où la vitesse du véhicule est réduite à une valeur voisine de 50 km/h. Il augmente ensuite fortement jusqu'à l'arrêt.

La valeur de F_e diminue lorsque l'effort par sabot et la vitesse initiale du freinage augmentent simultanément.

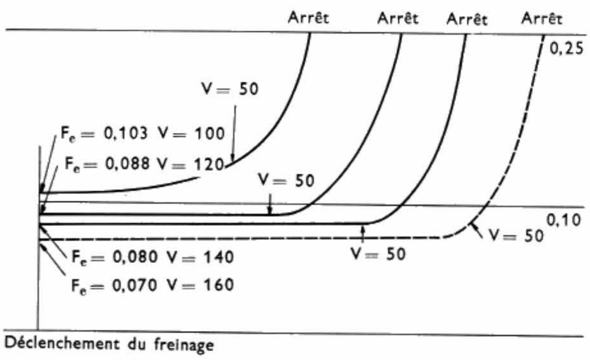


Fig. VIII-2 — Variation du coefficient de frottement F_e des semelles en fonte sur les roues, en fonction de la vitesse V exprimée en kilomètres par heure

Les courbes (fig. VIII-2), tirées d'essais pratiques, montrent les variations de F_e en fonction de la vitesse pour des vitesses initiales différentes, tandis que les courbes de la figure VIII-3 montrent la variation de F_e lorsque l'effort aux sabots prend des valeurs diverses.

Ce procédé de freinage fait appel à l'adhérence entre

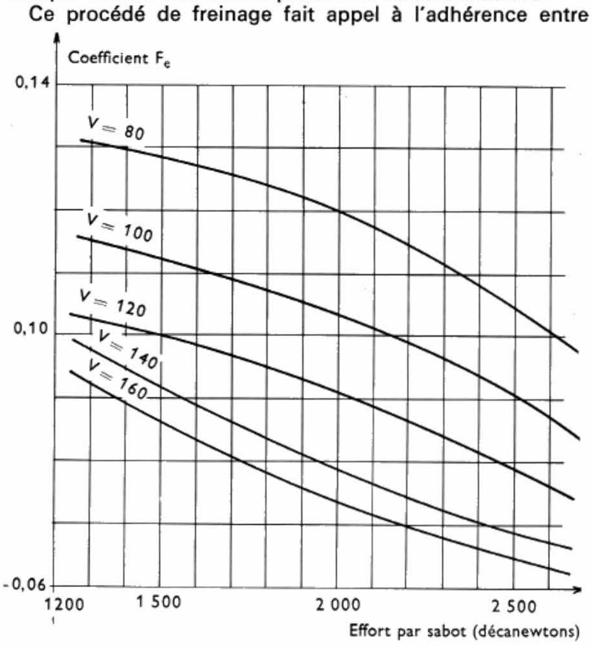


Fig. VIII-3 — Variation du coefficient de frottement des semelles en fonte sur les roues en fonction de l'effort par sabot (paramètre : la vitesse V exprimée en kilomètres par heure)

roue et rail ; pour en tirer le meilleur parti, il exige que l'effort retardateur Q soit à tout moment de très peu inférieur à celui qui permet cette adhérence (dans le cas contraire, il y aurait glissement puis arrêt de la roue, entraînant une baisse d'efficacité du freinage et des dégradations du chemin de roulement).

Pour une roue transmettant au rail une charge P et subissant l'effort retardateur d'un sabot appliqué en un point de sa circonférence par une force Q, on doit avoir à tout instant la relation :

$$Q = \frac{P\Phi}{F_e} - \varepsilon$$

en désignant par Φ le coefficient d'adhérence entre roue et rail, par F_e le coefficient de frottement de la fonte sur l'acier à un instant donné et par ε un nombre très petit (fig. VIII-4).

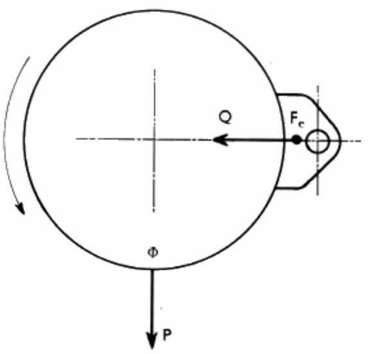


Fig. VIII-4

Principe du frein à sabots

Le coefficient Φ varie avec la vitesse mais sensiblement moins que le coefficient de frottement de la fonte sur l'acier. Il est avant tout fonction de l'état du rail. Sa valeur, par beau temps, peut atteindre 0,20, alors que dans des conditions défavorables (rail gras, humide, présence de feuilles sur le rail), elle peut parfois descendre au-dessous de 0,10. C'est cette dernière valeur qui est généralement admise dans le calcul des équipements de freinage, pour les vitesses usuelles (jusqu'à 160 km/h). Pour des vitesses plus grandes, il est prudent de ne compter que sur une valeur de 0,08 à 200 km/h et même 0,06 à 250 km/h.

En raison du coefficient de frottement assez faible de la fonte sur l'acier et de ses variations en fonction de divers facteurs, on a souvent recherché d'autres matériaux de frottement présentant des caractéristiques plus constantes. En particulier, ces dernières années, on a pu voir se développer l'utilisation de semelles de frein fabriquées en matériau composite à partir de mélanges assez voisins de ceux utilisés pour la confection des garnitures de freins d'automobile.

Ces semelles (fig. VIII-5) présentent l'avantage d'avoir un coefficient de frottement voisin de 0,3 c'est-à-dire beaucoup plus grand que celui de la fonte (environ trois fois plus grand) et sensiblement constant pendant toute la durée de l'arrêt. Il s'ensuit que l'on peut utiliser des équipements de frein de dimensions plus réduites et partant plus légers et que l'on peut se contenter d'assurer le freinage avec une seule semelle par roue. Dans les réalisa-

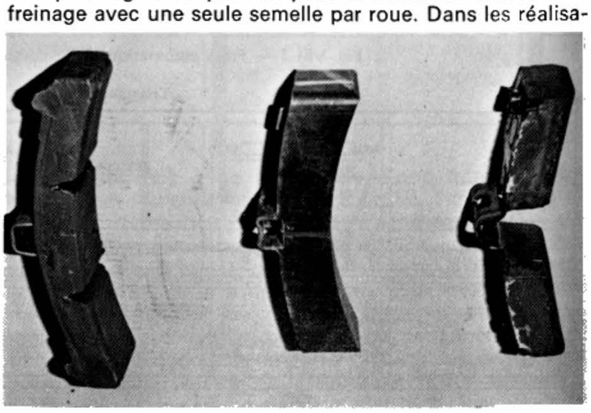


Fig. VIII-5 — Semelles en matériau composite (*S.N.C.F.*)

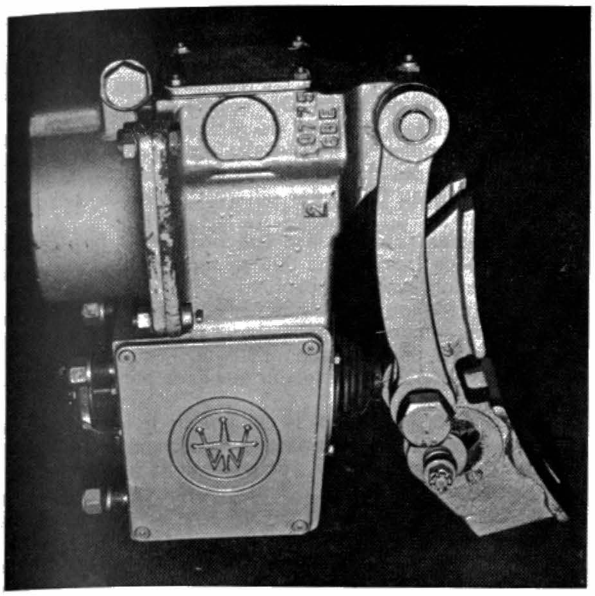


Fig. VIII-6 — Bloc de freinage pour application d'une semelle en matière composite sur la roue (*S.N.C.F.*)

tions récentes, on a supprimé toutes les tringleries et timoneries permettant de transmettre l'effort sur les semelles: chacune d'elles est appliquée par un bloc de freinage (fig. VIII-6) monté à côté de la roue, ce qui allège et simplifie la construction des bogies.

Des matériaux composites analogues constituent également la partie active des plaquettes de frottement utilisées avec le frein à disques. Ce dernier type de frein comporte généralement deux disques par essieu, qui peuvent être calés sur l'axe d'essieu (fig. VIII-7) ou boulonnés sur le moyeu de chaque roue ou encore constitués par des pistes

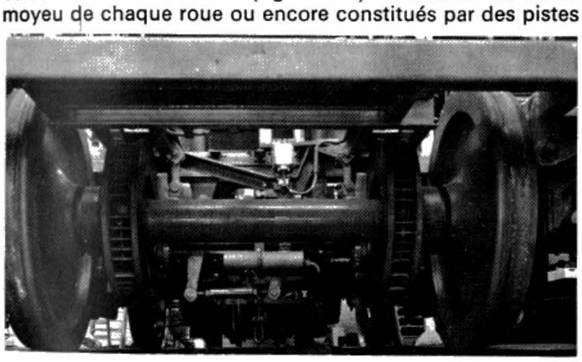


Fig. VIII-7 — Frein à deux disques par essieu, calés sur l'axe (*S.N.C.F.*)

de frottement en fonte fixées de part et d'autre du voile de la roue (fig. VIII-8).

Sauf dans le dernier cas cité, les disques sont creux, munis de nervures formant ailettes de ventilation pour assurer le refroidissement par une circulation d'air durant la rotation. Ils sont très souvent constitués par un moyeu en acier sur lequel sont fixées des pistes de frottement en fonte.

Les freins à disques présentent l'avantage d'éviter aux roues les fatigues thermiques dues au freinage et leur limite de dissipation d'énergie est plus grande que celle des freins à sabots en fonte appliqués sur les roues; cela permet de les utiliser à de grandes vitesses (au moins 250 km/h). Ils présentent aussi l'avantage d'avoir un fonctionnement silencieux et par là-même, améliorent le confort.

Ils ont toutefois l'inconvénient de moins bien utiliser l'adhérence entre roue et rail, le chemin de roulement n'étant pas « nettoyé » comme dans le cas du frein à sabots. C'est pourquoi l'on s'achemine, pour le freinage, à grande vitesse, vers un frein mixte comportant deux disques par essieu et un sabot en fonte par roue, ce dernier

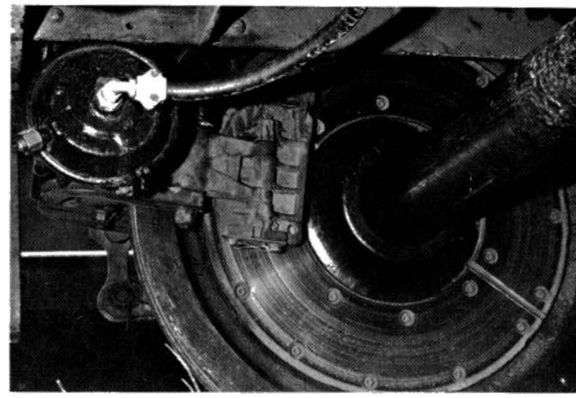


Fig. VIII-8 — Disque fixé sur le voile de la roue (*S.N.C.F.*)

améliorant l'adhérence et participant de façon intéressante à la dissipation de l'énergie et à la diminution des parcours d'arrêt.

2.1. Mise en œuvre du freinage. — Dès l'origine des chemins de fer, on a cherché à mettre au point, pour les trains de voyageurs, un frein pouvant être actionné sur l'ensemble du convoi par le mécanicien, c'est-à-dire un frein « continu ». Cela fut obtenu par l'emploi d'air comprimé; au moyen d'une conduite il était envoyé depuis la locomotive jusque dans les cylindres de frein équipant les véhicules et permettait l'application des sabots sur les roues au moyen d'une timonerie. Mais ce frein, appelé *frein direct*, présentait le grave inconvénient de perdre toute efficacité en cas de rupture d'attelage ou de simple désaccouplement des flexibles permettant de relier les véhicules entre eux.

Il était donc souhaitable que ce frein soit automatique, c'est-à-dire qu'il entre en action automatiquement en cas de rupture d'attelage. Le premier frein continu à air comprimé et automatique, pratiquement utilisable, fut inventé en 1872 par George Westinghouse.

L'augmentation de la vitesse et de la longueur des trains, ainsi que les conditions de plus en plus difficiles de l'exploitation ferroviaire, nécessitèrent l'amélioration des performances des équipements de frein. C'est pourquoi, à l'heure actuelle, les voitures et la majorité des wagons sont équipés de freins modernes à air comprimé, dont l'organe principal est appelé « distributeur ».

2.2. Description sommaire de l'équipement de frein d'un véhicule (V. fig. VIII-1). — Une *conduite générale* en tube d'acier de 25 ou 32 mm (1) de diamètre intérieur est établie sur toute la longueur du véhicule et porte à ses extrémités des flexibles permettant sa jonction à la conduite des véhicules voisins afin de pouvoir alimenter tout le train en air comprimé, à 5 bars (pression de régime), depuis le compresseur et les réservoirs de stockage de la locomotive.

Chacun des véhicules est aussi équipé d'un *réservoir auxiliaire* contenant l'air nécessaire au serrage du frein au moyen d'un ou plusieurs cylindres de frein.

Dans la timonerie ou dans les cylindres, est incorporé un appareil appelé *régleur automatique de timonerie*, qui maintient constant le jeu entre sabots et roues lorsque le frein est desserré: par variation de sa longueur, il compense ainsi les usures des organes de frottement.

Le serrage du frein est commandé par les baisses de pression produites dans la conduite générale, alors que le desserrage l'est par la remontée de la pression. Pendant cette dernière opération, la réserve d'air est reconstituée. Le frein se serre donc automatiquement en cas de rupture ou de forte fuite sur la conduite générale.

L'organe essentiel de l'équipement est un appareil assez complexe, appelé *distributeur*, qui a pour rôle d'établir

(1) Correspondant aux mesures anglaises, 1 pouce ou 1 pouce $^1/_4$, encore fréquemment utilisées dans la technique du freinage ferroviaire.

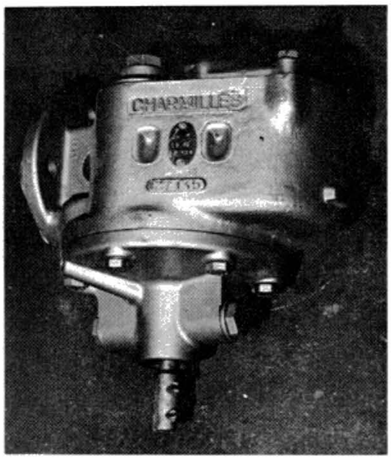


Fig. VIII-9

Distributeur de frein (*S.N.C.F.*)

les différentes communications entre la conduite générale, le réservoir auxiliaire et le cylindre de frein.

Les distributeurs, dont la figure VIII-9 présente l'aspect extérieur, comportent un dispositif principal dont le rôle est d'assurer que les variations de pression au cylindre de frein reproduisent celles qui sont réalisées dans la conduite générale. Ce dispositif est constitué (fig. VIII-10) par un équipage mobile comprenant une tige creuse débouchant dans une chambre en relation avec l'atmosphère. Cette tige est soumise aux efforts de deux membranes *s* et *S* de sections différentes ; dans son mouvement ascendant elle permet de fermer l'échappement du cylindre de frein et

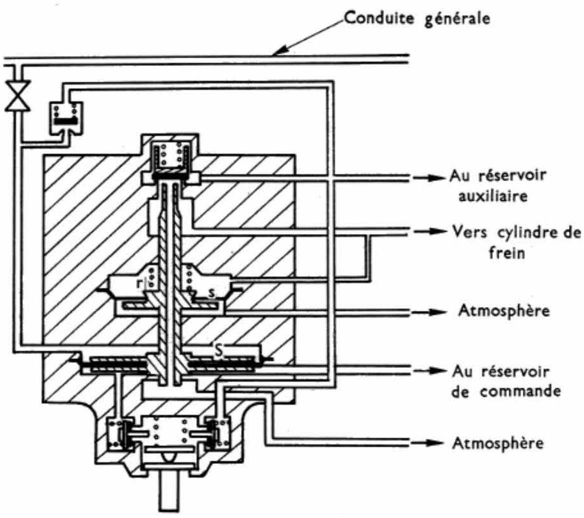


Fig. VIII-10 — Schéma du « dispositif principal » d'un distributeur de frein

de soulever le clapet d'admission de l'air du réservoir auxiliaire.

La membrane *S* subit, sur sa face supérieure, la pression de la conduite générale et, sur sa face inférieure, la pression d'un réservoir de quelques litres appelé *réservoir de commande*, rempli à la pression de régime (5 bars) lors du desserrage complet du frein. Cette pression de référence est maintenue pratiquement constante dans le réservoir de commande au cours des différentes phases de fonctionnement.

La membrane *s* subit, sur sa face supérieure, la pression du cylindre de frein tandis que sa face inférieure est en communication avec l'atmosphère.

Lors d'un serrage commandé par une baisse de pression définie dans la conduite générale, la pression du réservoir de commande devient prépondérante, l'équipage mobile est soulevé et l'air du réservoir auxiliaire pénètre dans le cylindre de frein.

Lorsque la pression dans le cylindre de frein atteint une valeur suffisante, son effort sur la membrane *s* fait redescendre l'équipage mobile, permettant la fermeture du clapet d'admission d'air au cylindre de frein sans ouverture de la tige creuse d'échappement. On obtient ainsi une position d'équilibre correspondant à un palier de serrage. Par de nouvelles baisses de pression dans la conduite générale, le processus se renouvelle jusqu'au *serrage à fond*, c'est-à-dire jusqu'à la pression maximale prévue dans le cylindre de frein.

De même, pour le desserrage, toute augmentation de la pression dans la conduite générale rompt l'équilibre de l'équipage mobile qui, sollicité vers le bas, ouvre la tige creuse d'échappement du cylindre de frein jusqu'à ce qu'un nouvel état d'équilibre soit établi. Lorsqu'on rétablit la pression de régime dans la conduite générale, grâce à l'effort du ressort *r*, le cylindre de frein est en permanence en communication avec l'atmosphère : le frein est totalement desserré. Un tel appareil est donc « modérable » au serrage et au desserrage.

Les distributeurs comportent encore plusieurs organes complémentaires (fig. VIII-11) :

— L'accélérateur qui assure une ponction d'air déterminée sur la conduite générale au moment de la première dépression, favorisant ainsi la mise en action sûre, de proche en proche, des distributeurs suivants. La bonne sensibilité des accélérateurs permet d'atteindre une vitesse de propagation de l'onde déclenchant le freinage d'environ 280 m/s, assez proche de la vitesse du son, valeur limite.

— Le dispositif de coupure, chargé d'isoler le réservoir de commande de la conduite générale lors de la première dépression.

— Le dispositif d'alimentation du réservoir auxiliaire : dans son circuit est incorporé un clapet de retenue empêchant, lors du serrage, l'air du réservoir de s'écouler vers la conduite générale.

— Le dispositif de *premier temps* (pour les distributeurs des trains de marchandises qui ont un temps de serrage

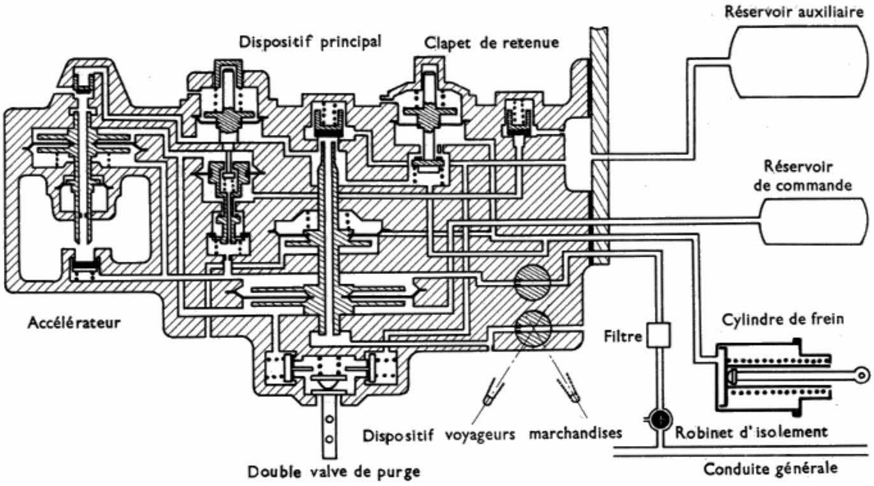


Fig. VIII-11

Schéma d'un distributeur de frein

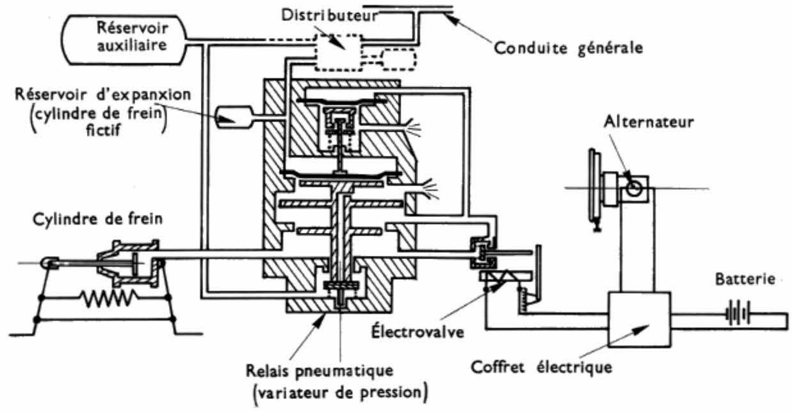


Fig. VIII-12

Schéma de montage d'un relais pneumatique à deux rapports pour frein à deux étages d'efforts aux sabots

long), permettant une première application rapide des sabots sur les roues avec un effort voisin de 10 % de l'effort final, puis le développement progressif de l'effort de freinage en un temps voisin de 25 s.

— Le dispositif *voyageurs-marchandises* qui assure, grâce à des jeux d'orifices appropriés, les temps de remplissage et de vidange du cylindre de frein propres à ces deux types de circulation.

D'autres appareils de complément, qui peuvent faire partie intégrante du distributeur ou au contraire être séparés, permettent d'obtenir un freinage dit à deux étages d'efforts aux sabots ou encore un freinage autovariable en fonction de la charge.

Le freinage à deux étages d'efforts aux sabots, utilisé sur les voitures, trouve sa justification dans le fait que, ainsi qu'on l'a déjà dit, le coefficient de frottement de la fonte sur l'acier des roues augmente très fortement entre 50 km/h et l'arrêt. Pour éviter l'enrayage des essieux, avec un frein normal, il faut que l'effort d'application des sabots soit limité à la valeur permise à basse vitesse. On perd ainsi beaucoup sur l'effort retardateur et sur le parcours d'arrêt qui pourraient être obtenus à grande vitesse. Pour remédier à ce défaut, sur les véhicules circulant à plus de 140 km/h, il est nécessaire d'opérer en deux temps, grâce à un relais pneumatique à deux rapports commandé par électrovalve (fig. VIII-12). Un frein à deux étages d'efforts permet d'appliquer aux sabots un effort intense de la vitesse maximale jusqu'à 50 km/h, puis un effort réduit d'environ moitié de 50 km/h à l'arrêt. Le passage de la haute pression à la basse pression et vice versa est obtenu grâce à un alternateur tachymétrique monté en bout d'un essieu (fig. VIII-13) ; par l'intermédiaire d'un coffret de commande il permet d'exciter au moment opportun l'électrovalve du relais pneumatique.

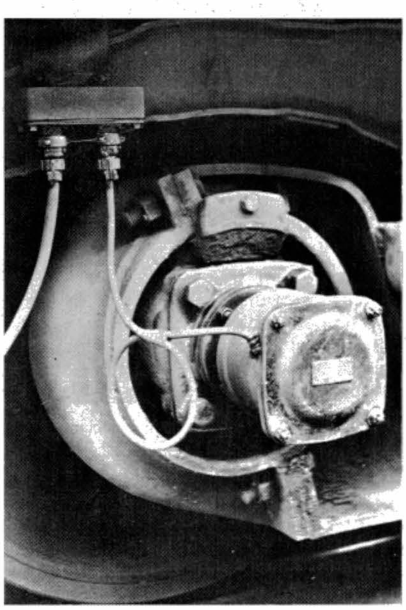


Fig. VIII-13

Alternateur tachymétrique monté en bout d'essieu (*S.N.C.F.*)

Le freinage autovariable en fonction de la charge est appliqué sur les wagons dont le rapport entre la masse en charge et la masse à vide est important (voisin de 4). Sans disposition particulière, pour éviter l'enrayage des essieux lorsque le wagon est vide on devrait se contenter d'une puissance de freinage correspondant à la tare ; elle serait très insuffisante pour le wagon chargé.

Ce type de freinage est obtenu grâce à un relais à rapport variable en fonction de la charge du véhicule (fig. VIII-14) ; placé entre le distributeur et le cylindre de frein, il permet de fournir à ce dernier de l'air sous une pression d'autant plus élevée que la charge du wagon est plus grande.

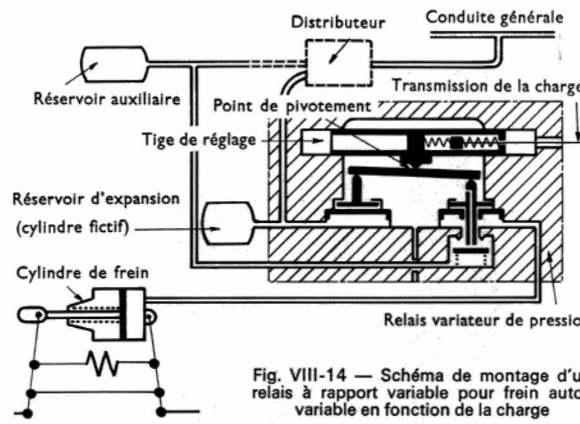
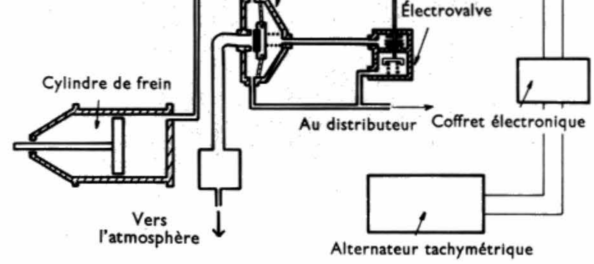


Fig. VIII-14 — Schéma de montage d'un relais à rapport variable pour frein autovariable en fonction de la charge

2.3. Dispositifs anti-enrayeurs. — Les performances exigées d'un frein à deux étages d'effort aux sabots, c'est-à-dire l'arrêt du véhicule en 500 m à 120 km/h, sollicitent assez fortement l'adhérence. En cas de rail particulièrement glissant, pour éviter les effets nocifs de l'enrayage des essieux, on peut adjoindre un système anti-enrayeur à l'équipement de frein. Ce dispositif se compose d'une électrovalve commandant une valve d'échappement à grand débit (fig. VIII-15) permettant de vider très rapidement le cylindre de frein à l'atmosphère.

Cette électrovalve est commandée par l'intermédiaire d'un coffret électronique mesurant la décélération à partir

Fig. VIII-15



d'alternateurs ou de roues phoniques montés en bout de chacun des essieux. Si la décélération de l'un d'eux dépasse un certain seuil (environ 4 m/s²), très supérieur à celui de la décélération normale du freinage, l'électrovalve est excitée : la valve interrompt la communication entre le distributeur et le cylindre de frein et provoque une chute brusque de la pression au cylindre de frein, suivie d'une vidange plus lente, permettant aux essieux intéressés de reprendre leur vitesse de rotation normale. À ce moment, l'électrovalve est désexcitée et cela provoque la réalimentation du cylindre de frein, à partir du distributeur donc le rétablissement de l'effort de freinage.

2.4. Appareils de commande des freins. — À partir de la locomotive, les freins sont commandés à l'aide d'un *robinet de mécanicien*, organe chargé de réaliser les variations de pression dans la conduite générale. En cours de route, en l'absence de freinage, le mécanicien doit maintenir la pression de régime (5 bars) dans la conduite générale en compensant les petites fuites qui se produisent inévitablement tout au long du train mais cela dans une limite assez réduite pour que toute perte d'air importante (signal d'alarme laissant échapper l'air de la conduite générale, rupture de conduite, etc.) provoque à coup sûr le serrage des freins et soit immédiatement perçue.

Les anciens robinets (un par cabine de conduite) (fig. VIII-16) sont à valve rotative se déplaçant sur une table percée d'orifices. Suivant les positions de la poignée, on réalise les communications nécessaires à la commande du frein.

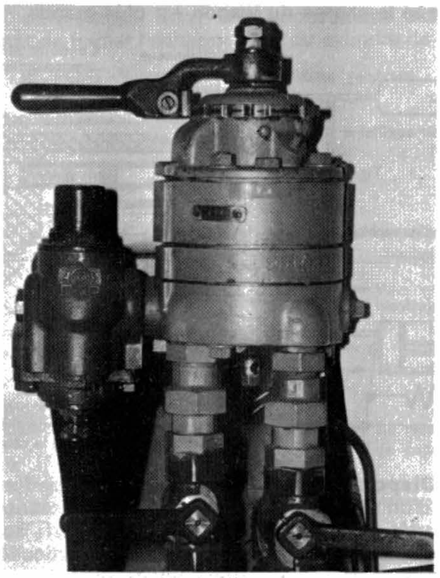


Fig. VIII-16 — Robinet de mécanicien de type ancien, à valve rotative (*S.N.C.F.*)

Il existe également des robinets dits *manométriques* (fig. VIII-17) : leur poignée agit sur le ressort d'un détendeur d'air alimentant la conduite générale de frein. La pression qui s'y établit est fonction de l'angle de rotation de la poignée. Pendant la marche, la position donne la pression de régime de 5 bars.

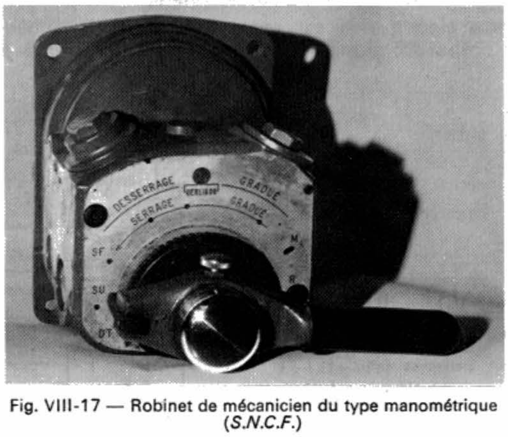


Fig. VIII-17 — Robinet de mécanicien du type manométrique (*S.N.C.F.*)

Actuellement, toutes les locomotives récentes de la S.N.C.F. sont équipées d'un robinet de mécanicien à commande électrique, dit *presse-bouton*, spécialement étudié pour les locomotives comportant deux postes de conduite. Les variations de pression dans la conduite générale sont réalisées par un équipement central électro-pneumatique unique, commandé à distance, de chaque poste de conduite, par des interrupteurs électriques actionnés par petits leviers (serrage et desserrage) et boutons poussoirs.

Les manœuvres du frein, notamment celles du desserrage complet dans le temps le plus court, qui comportent plusieurs phases successives sont automatisées au maximum ce qui facilite beaucoup la tâche du personnel de conduite. Les figures VIII-18 et VIII-19 montrent l'aspect du bloc central et celui du pupitre de commande.

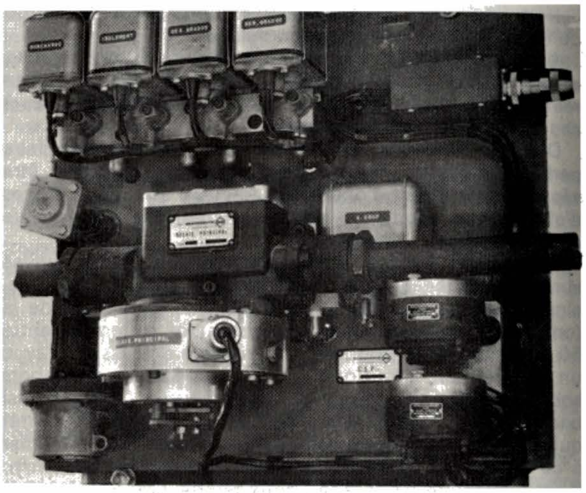


Fig. VIII-18 — Robinet de mécanicien à commande électrique, dit presse-bouton ; équipement central (*S.N.C.F.*)

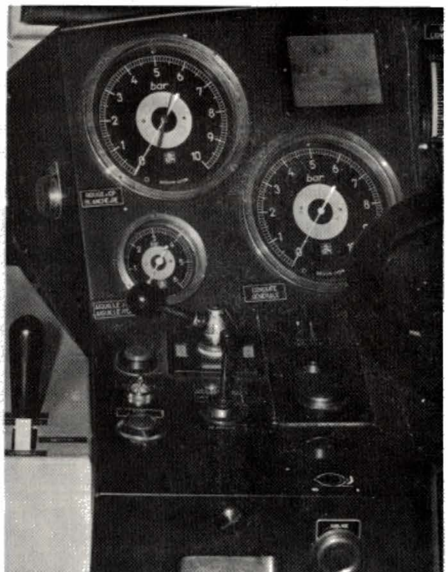


Fig. VIII-19 — Robinet de mécanicien à commande électrique, dit presse-bouton, pupitre de commande (*S.N.C.F.*)

2.5. Commande électrique du frein (frein électro-pneumatique). — Le frein pneumatique moderne, malgré tous les perfectionnements dont il a fait l'objet, fait néanmoins preuve de quelques insuffisances notamment sur les trains longs. Les temps de desserrage des derniers véhicules sont longs : le relâchement complet du frein n'est effectif

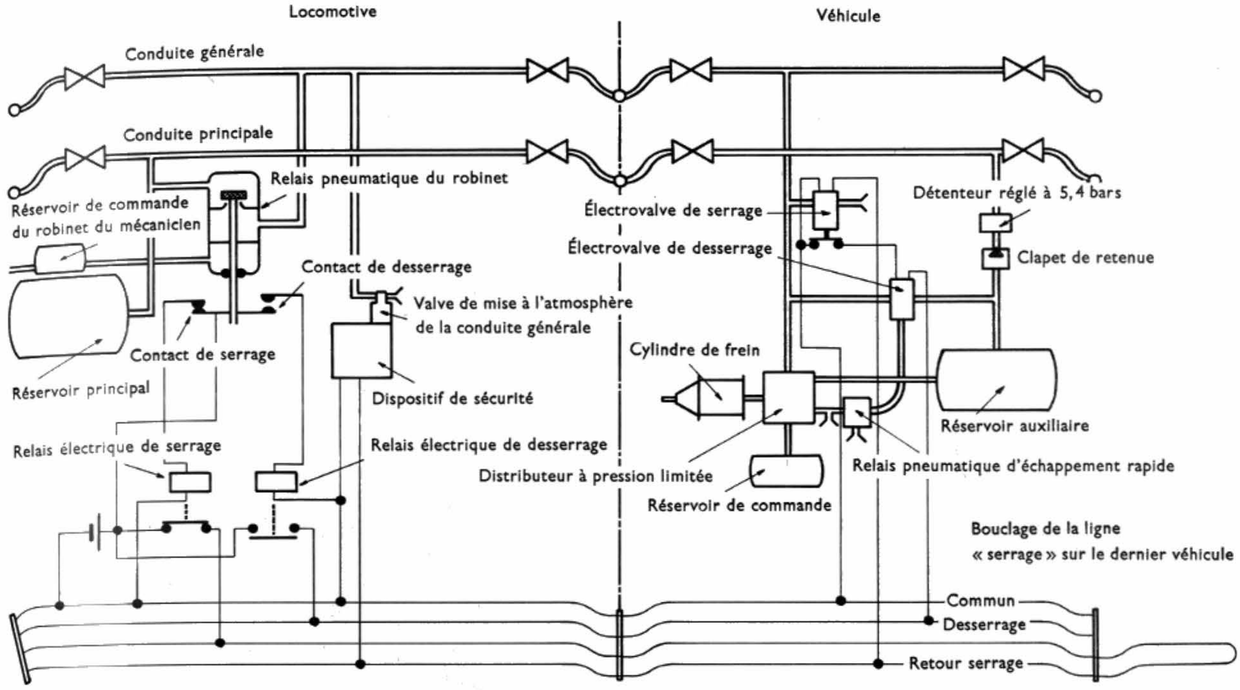


Fig. VIII-20 — Schéma du frein électropneumatique du type automatique à deux conduites

qu'après reconstitution de la réserve d'air dans le réservoir auxiliaire et cet air passe obligatoirement dans une conduite générale de faible diamètre et de grande longueur. Les temps de serrage des derniers véhicules sont également longs : bien que la vitesse de propagation de l'ordre de freinage (qui provoque la mise en action du frein) soit de 280 m/s, la pression dans la conduite générale, qui est vidée à l'autre extrémité du train par le robinet du mécanicien, baisse lentement en queue du convoi et la montée en pression du cylindre de frein est elle-même lente.

L'utilisation d'une commande électrique du frein tout au long du train, c'est-à-dire du frein dit *électropneumatique*, apporte des avantages importants :

— Grande maniabilité procurée par des temps de réponse très réduits.

— Disparition complète des réactions de freinage grâce à la simultanéité du serrage et du desserrage de tous les véhicules.

— Gain sur les distances d'arrêt, sans sollicitation supplémentaire de l'adhérence, dû à la plus grande rapidité du serrage de la partie arrière du train.

Ces qualités font que le frein électropneumatique est particulièrement apte à favoriser le développement de l'automatisme dans la conduite des trains.

Tous les trains rapides de la S.N.C.F., circulant à des vitesses de 160 km/h et plus, sont équipés du frein électropneumatique du type automatique à deux conduites.

Dans ce schéma de frein électropneumatique (fig. VIII-20), le réservoir auxiliaire de chaque véhicule est alimenté en permanence, à travers un détendeur réglé à 5,4 bars par une deuxième conduite à haute pression (8 à 9 bars) établie sur toute la longueur du train. Chaque véhicule est équipé d'une électrovalve de serrage qui, lorsqu'elle est excitée, vidange localement la conduite générale, et d'une électrovalve de desserrage qui, à partir du réservoir auxiliaire (pression 5,4 bars), permet de recharger localement la conduite générale. Ces électrovalves sont commandées automatiquement lors de la manœuvre du robinet de mécanicien, à l'aide d'une « ligne » de train comportant une ligne serrage, une ligne desserrage et une ligne « moins » alimentées par la batterie de la locomotive (72 V). La conjugaison de l'action du robinet de mécanicien et des électrovalves des véhicules rend simultanées, tout au long du train, les variations de pression de la conduite générale.

2.6. Frein électromagnétique. — C'est un frein qui permet d'améliorer les performances d'arrêt, en agissant sur le rail lui-même, c'est-à-dire en s'affranchissant de l'adhérence entre roue et rail et des effets thermiques néfastes qui se produisent entre sabots et roues. Il comporte des patins (deux par bogie) frottant sur le rail sur lequel il est appliqué avec une force importante par des électroaimants. En position de repos, les patins sont suspendus à une dizaine de centimètres de chaque file de rail (fig. VIII-21). Lorsqu'on veut freiner, on applique les patins sur le rail à l'aide de petits cylindres à air comprimé (sans répercussion sur la charge des essieux) et l'on excite les électroaimants. Ceux-ci sont désexcités et remontés lorsque la vitesse n'est plus que 50 km/h, cela afin d'éviter une trop forte augmentation de la décélération avant l'arrêt.

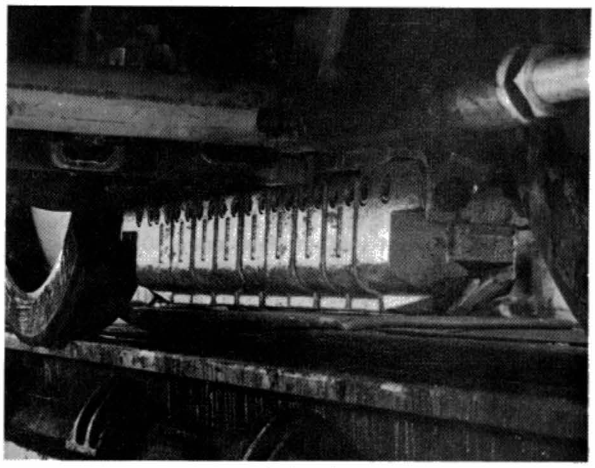
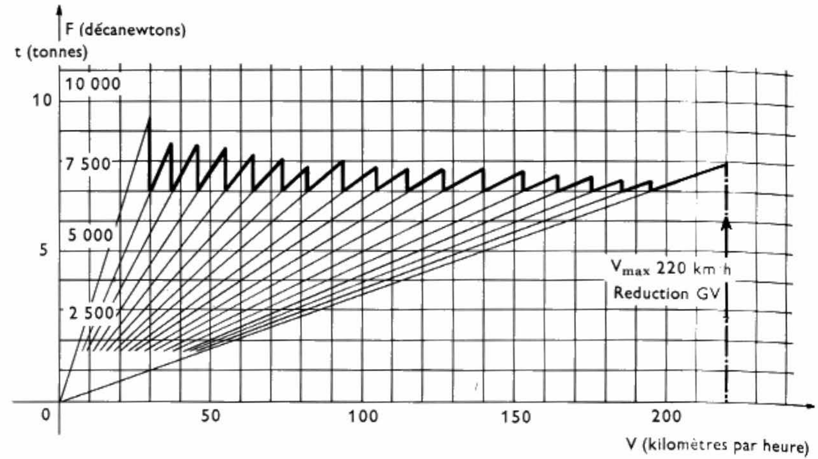


Fig. VIII-21 — Frein électromagnétique à patins de frottement sur le rail (*S.N.C.F.*)

Le frein électromagnétique n'est pratiquement utilisé, en complément du frein classique (à sabots ou disques), que lors des freinages d'urgence où l'on doit s'arrêter sur la distance la plus courte possible. Aux vitesses de 160 à 200 km/h, il permet de réduire d'environ 25 % les distances d'arrêt obtenues avec un frein à deux étages d'efforts aux sabots ou un frein à disques de puissance équivalente.

Fig. VIII-22

Effort de retenue F du frein rhéostatique des locomotives CC 6 500 (freinage d'urgence)



3. FREINS DYNAMIQUES

3.1. Frein rhéostatique — Frein à récupération. — Sur les locomotives électriques ou Diesel à transmission électrique, on peut utiliser comme moyen de freinage propre de l'engin l'effort de retenue des moteurs électriques fonctionnant en génératrices (V. chap. 4).

L'énergie ainsi produite peut être transformée en chaleur dans des résistances ventilées : c'est le freinage rhéostatique (applicable aux locomotives électriques ou Diesel), ou encore renvoyée dans la ligne d'alimentation : c'est le freinage par récupération.

L'effort de retenue est réglé par variation de l'excitation des moteurs fonctionnant en génératrices. Son fonctionnement peut être combiné avec celui du frein à air du train remorqué ou encore superposé à une partie de l'effort de retenue du frein pneumatique de la locomotive. Cela permet d'obtenir une bonne puissance de freinage, même pour des engins lourds.

La figure VIII-22 montre la variation de l'effort de retenue du frein rhéostatique des locomotives de construction récente CC 6 500 dont la masse est de 115 t.

Les dispositions nécessaires doivent être prises pour que le freinage rhéostatique soit de fonctionnement rapide et très sûr. Il est nécessaire, en particulier, d'assurer l'amorçage des moteurs fonctionnant en génératrices même en cas d'absence de courant dans la caténaire.

3.2. Frein hydraulique. — Sur les locomotives à transmission hydraulique, on peut utiliser le fluide (qui est de l'huile) dans un frein hydraulique pour exercer un effort retardateur par l'intermédiaire de la transmission. Le fluide circule de façon forcée grâce à la disposition des aubes d'un rotor tournant (avec l'arbre secondaire de la transmission) dans un stator fixe. L'énergie dissipée échauffe l'huile qui est refroidie dans un échangeur de chaleur. L'importance de l'effort de retenue est fonction du degré de remplissage des circuits de freinage.

L'application d'un tel frein, agissant avec un couple retardateur important (400 m.daN) entre 300 et 80 km/h, peut aussi être envisagée sur du matériel remorqué. La S.N.C.F. se propose d'effectuer une expérimentation sur une voiture à grande vitesse.

3.3. Frein à courants de Foucault. — Ce type de frein peut être rotatif ou linéaire. Dans le frein rotatif (fig. VIII-23), analogue aux ralentisseurs utilisés sur les véhicules routiers de fort tonnage, un rotor est calé sur l'arbre moteur ou l'axe d'essieu, en deux parties symétriques comportant chacune un disque autoventilé en acier moulé magnétique. Un stator fixe comportant huit bobines à pôles Nord-Sud alternés permet de donner à pleine excitation (lorsque les huit bobines sont sous tension, et que la puissance absorbée atteint 1,5 kW) un couple de retenue de 200 m.daN à 1 100 tr/mm. Cet effort peut être gradué en quatre paliers en alimentant les bobines deux à deux.

Le frein linéaire (fig. VIII-24) comporte deux patins placés à quelques millimètres au-dessus des deux files de rails, entre les roues des deux essieux du bogie. Chaque

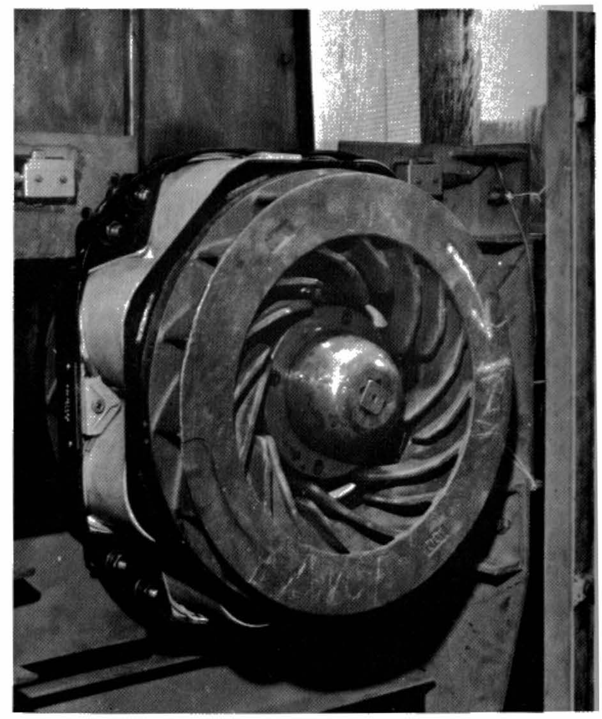


Fig. VIII-23 — Frein rotatif à courants de Foucault (*S.N.C.F.*)

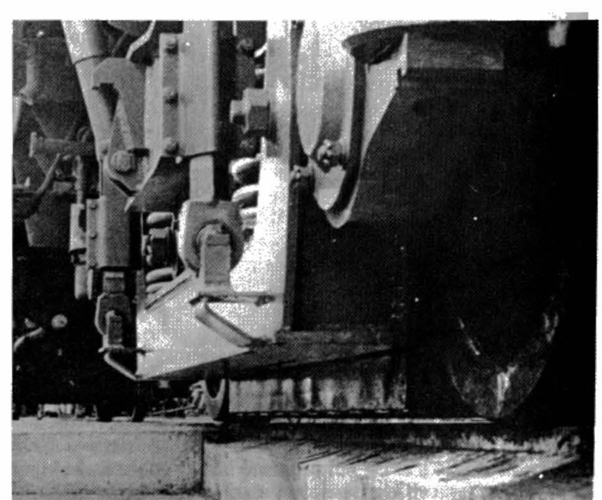


Fig. VIII-24 — Frein linéaire à courants de Foucault dans le rail (*S.N.C.F.*)

patin comporte neuf bobines entourant les pôles, les bobines étant connectées en série de telle sorte que le champ magnétique se referme entre deux pôles successifs par l'intermédiaire du rail. Lors du déplacement du patin, lorsqu'on alimente les bobines, des courants de Foucault sont induits dans le rail et les actions électromagnétiques qui se produisent s'opposent au déplacement. Pour une puissance absorbée voisine de 50 kW, on obtient un effort retardateur proche de 1 000 daN pour un patin de 2 m de longueur et pour une vitesse comprise entre 200 et 100 km/h.

4. FREINAGE DES TRAINS À TRÈS GRANDE VITESSE

Le freinage des trains circulant à très grande vitesse (jusqu'à 300 km/h) sur des infrastructures nouvelles, sera réalisé par une combinaison des systèmes connus : freins dynamiques et freins à frottement.

En effet, la plupart des véhicules composant ces trains devant être équipés d'essieux moteurs, le frein principal, agissant entre la vitesse maximale et environ 40 km/h, sera le frein électrique rhéostatique. Toutefois, pour parer à toute défaillance de ce type de frein (bien que toutes précautions soient prises pour qu'il soit fiable), il a été prévu sur l'arbre de chaque moteur un frein rotatif à courants de Foucault qui se substituera automatiquement au frein rhéostatique éventuellement défaillant.

On peut envisager l'application de freins hydrauliques sur les essieux non moteurs et l'application du frein linéaire à courants de Foucault sur les divers bogies (la puissance importante d'alimentation pourra aisément être prélevée sur le courant rhéostatique de freinage). Mais tous ces freins n'agissant pas jusqu'à l'arrêt, on aura encore recours à un frein secondaire à sabots qui sera appliqué avec un effort très faible aux très grandes vitesses (il permettra d'améliorer l'adhérence) et qui, à partir des vitesses usuelles (120 à 180 km/h), sera appliqué avec un effort normal pour se substituer aux différents freins dynamiques dont l'action cessera aux vitesses comprises entre 120 et 40 km/h.

5. CONCLUSION

L'exposé qui précède permet d'apprécier la nature des problèmes posés par le freinage des trains. Les masses à freiner sont importantes et les performances de freinage sont limitées à la fois par l'adhérence disponible sur le rail, qui a une valeur relativement faible (comparée à la route par exemple), et par les difficultés rencontrées du fait de l'énergie thermique engendrée par le freinage. Par ailleurs, les performances réalisées doivent être indépendantes des conditions atmosphériques, puisqu'elles sont définies par les distances d'implantation des signaux. En fait, les problèmes de signalisation et de freinage sont étroitement liés.

Les problèmes posés pouvaient être résolus par des moyens relativement simples à l'origine mais leur complexité est de plus en plus grande avec l'accroissement des vitesses et des charges, l'objectif étant de toujours conserver cet élément essentiel du transport ferroviaire : la sécurité.

CHAPITRE IX

INSTALLATIONS DE SÉCURITÉ

1. GÉNÉRALITÉS

La sécurité de la marche des trains est assurée sur les chemins de fer, d'une part, grâce à une **réglementation** à appliquer strictement par les agents intéressés (mécaniciens, aiguilleurs, agents de manœuvre dans les gares), d'autre part, grâce à des installations appelées **installations de sécurité.**

Le but de ces installations est double :

— Empêcher la *collision* de deux trains par *rattrapage* (trains de même sens sur la même voie) ou *nez à nez* (trains de sens inverse sur la même voie) ou par *prise en écharpe* (trains circulant sur deux voies convergentes).

— Empêcher le *déraillement* d'un train sur l'*aiguillage* d'un appareil de voie par enfourchement (aiguille mal collée ou en cours de mouvement).

Les installations de sécurité réalisent des *liaisons :*

— entre aiguilleurs et mécaniciens par l'intermédiaire des *signaux ;*

— entre aiguillages d'une part, aiguilleurs, autres aiguillages et signaux d'autre part, dans les *postes d'aiguillages.*

D'autres installations de sécurité assurent la protection des trains aux *passages à niveau :*

— soit indirectement: **dispositifs d'annonce** aux passages à niveau gardés qui renseignent les gardes-barrières sur l'approche d'un train,

— soit directement: **signaux automatiques lumineux** qui arrêtent la circulation routière à l'approche d'un train.

Les installations de sécurité sont conçues d'après le principe général suivant: *aucun défaut de l'installation ne doit avoir de résultat contraire à la sécurité.* C'est ainsi qu'une panne de courant, une rupture de fil électrique, un court-circuit, peuvent provoquer la fermeture d'un signal ouvert mais ne peuvent jamais entraîner l'ouverture d'un signal qui doit être fermé. En outre, chaque élément de l'installation doit ou bien satisfaire lui-même au principe ci-dessus (il est dit alors de *sécurité intrinsèque*) ou bien être contrôlé par un autre élément.

Ces éléments — qui vont être étudiés successivement — se retrouvent groupés différemment dans les divers types d'installations de sécurité:

— Les *installations de cantonnement,* dont la fonction est d'empêcher le rattrapage.

— Les *postes d'aiguillage* dont la fonction est à la fois d'assurer aux trains la bonne direction et d'empêcher les déraillements par enfourchement ou prise en écharpe.

— Les installations de *voie unique* qui assurent le croisement des trains et empêchent le nez à nez entre deux points de croisement.

— Les installations de *passages à niveau* dont la fonction est d'empêcher la collision des trains et des circulations routières.

Ces différents types sont souvent interpénétrés:

— Cantonnement et postes d'aiguillages.

— Voie unique et postes de croisement.

— Voie unique et cantonnement.

— Installations de passages à niveau et cantonnement.

On distingue aussi, selon l'origine de l'énergie utilisée (humaine ou électrique) :

— les installations de **signalisation mécanique ;**

— les installations de **signalisation électrique.**

La signalisation mécanique — historiquement la première — a été progressivement concurrencée par la signalisation électrique, qui diminue la peine des hommes (aiguilleurs) tout en augmentant leur productivité. À l'heure actuelle, la signalisation mécanique est encore assez largement représentée, mais pratiquement toutes les nouvelles installations — ou renouvellements d'installations — se font en signalisation électrique.

2. LES DIVERS ÉLÉMENTS DES INSTALLATIONS DE SÉCURITÉ

2.1. Les signaux. — Quelle que soit leur réalisation matérielle (signaux mécaniques ou électriques), on distingue les signaux par leurs fonctions, dont les principales sont:

Signaux d'arrêt (immédiat ou différé) :

— Carré: arrêt absolu.

— Carré violet: arrêt absolu sur voies secondaires des gares.

— Sémaphore: arrêt franchissable à certaines conditions.

— Avertissement: annonce d'un carré rouge ou d'un sémaphore.

— Préavertissement: lorsque la distance de l'avertissement au carré ou au sémaphore est insuffisante.

— Préannonce: annonce de l'avertissement pour train roulant à plus de 160 km/h.

— Disque rouge: arrêt différé.

— Guidon d'arrêt: matérialise le point d'arrêt d'un disque rouge.

— Bande jaune: voie courte ou partiellement occupée.

Signaux de limitation de vitesse :

— Ralentissement: annonce d'une limitation de vitesse à 30 km/h (ou 60 km/h).

— Rappel de ralentissement: exécution de la limitation de vitesse.

— Tableaux indicateurs de vitesse (*TIV*): fixes, effaçables ou temporaires (signaux de chantier).

Signaux de renseignement :

— Indicateurs de direction.

— Tableau à inscription (Bifur, Heurtoir, Garage, Sifflez, etc.).



Fig. IX-1 — Crocodile (*S.N.C.F.*)

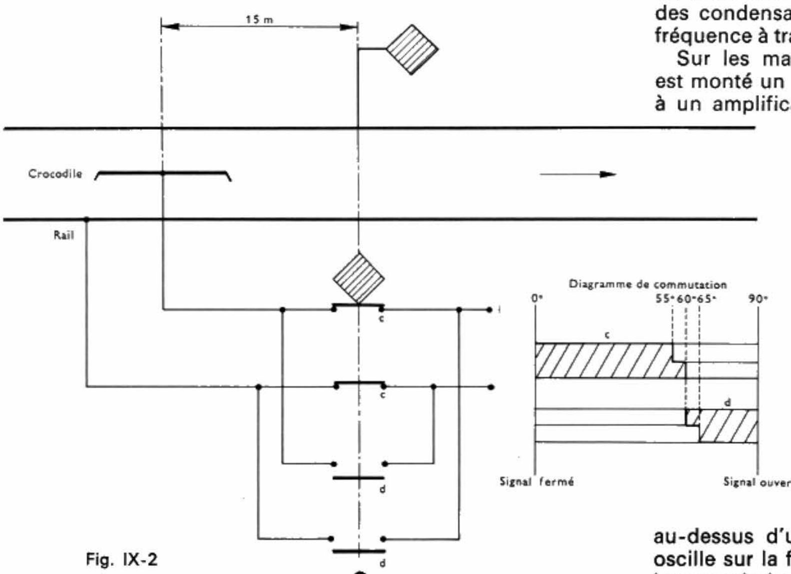


Fig. IX-2

Commutateur d'extérieur solidaire de la cible du signal

Signaux divers :

— Signaux à main (drapeau rouge, drapeau jaune, damier rouge, signal de départ).

— Signaux détonants (pétards, détonateurs) isolés ou appuyant un signal.

— Signaux portés par les trains (à l'arrière en général).

— Signaux spéciaux à la traction électrique :

- Baisser panto.
- Lever panto.
- Couper courant.
- Fin de contact.

L'aspect des principaux signaux est représenté sur planche hors-texte.

Pour parer au manque d'attention possible d'un mécanicien, les signaux sont répétés par un dispositif acoustique dans la cabine de conduite de la locomotive. Ce dispositif est déclenché par le passage d'une *brosse* métallique, portée par la locomotive, sur un contact fixe de la voie appelé *crocodile* (fig. IX-1). Le crocodile est porté à la tension positive ou négative d'une batterie de piles selon que le signal est fermé ou ouvert (1) (fig. IX-2). Sur la machine, la polarité + déclenche un sifflet ou un avertisseur et une inscription sur la bande de l'indicateur de vitesse ; la polarité — déclenche un timbre. Cette *double répétition* permet au mécanicien de contrôler le bon fonctionnement de l'appareillage au passage de chaque signal.

La forme ondulée des lames constituant le crocodile est destinée à améliorer le nettoyage du contact brosse-crocodile, notamment par temps de verglas.

Sur les portions de lignes parcourues à une vitesse supérieure à 160 km/h, la répétition par crocodile ne suffit pas. Il s'y ajoute une *balise* (fig. IX-3), c'est-à-dire un circuit accordé inductance-condensateur. La balise est commutable à partir des organes de commande des signaux (signalisation lumineuse exclusivement) et ainsi à chaque indication à répéter (voie libre, préannonce, avertissement, carré ou sémaphore) correspond une fréquence particulière. À cet effet, la balise est constituée de deux enroulements : un enroulement donnant un accord fixe et un autre enroulement couplé avec ce dernier comportant des condensateurs d'accord commutés en fonction de la fréquence à transmettre (fig. IX-4).

Sur les machines pouvant circuler à plus de 160 km/h est monté un capteur comportant deux enroulements reliés à un amplificateur apériodique. Lorsque le capteur passe au-dessus d'une balise, l'ensemble capteur-amplificateur oscille sur la fréquence d'accord de la balise, ce qui assure la transmission de l'information correspondante à la machine.

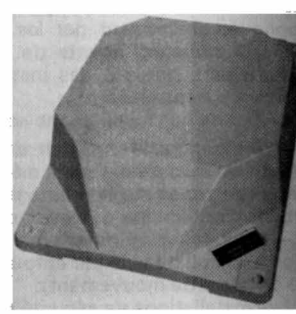


Fig. IX-3 — Balise (*S.N.C.F.*)

Cette transmission, provoque, d'une part, une répétition par voyants lumineux, d'autre part, le déclenchement automatique du freinage d'urgence dans le cas où le mécanicien ne réduirait pas suffisamment sa vitesse au passage d'une préannonce.

Les *signaux mécaniques* (fig. IX-5) sont constitués par un mât fixe (profilé *HN*) en tête duquel sont montés deux paliers entre lesquels pivote un arbre vertical. Le voyant (ou cocarde du signal), en tôle émaillée, est fixé directement sur l'arbre. L'arbre est entraîné par un levier à contrepoids par l'intermédiaire d'un dispositif de calage qui empêche le voyant de tourner sous l'influence du vent. Le levier est monté de façon telle que le signal est rappelé par le contrepoids en position de fermeture : voyant perpendiculaire à la voie.

Dans le cas du sémaphore, le voyant est une palette de forme allongée, mobile autour d'un axe horizontal. La

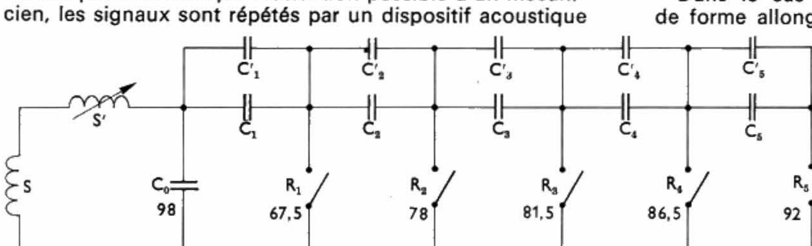


Fig. IX-4

(1) En signalisation lumineuse, les feux du carré, du carré violet, du sémaphore, de l'avertissement, du préavertissement, du disque rouge, du ralentissement sont répétés par une polarité positive, les autres feux par une polarité négative. Certains *T/V* sont également répétés.

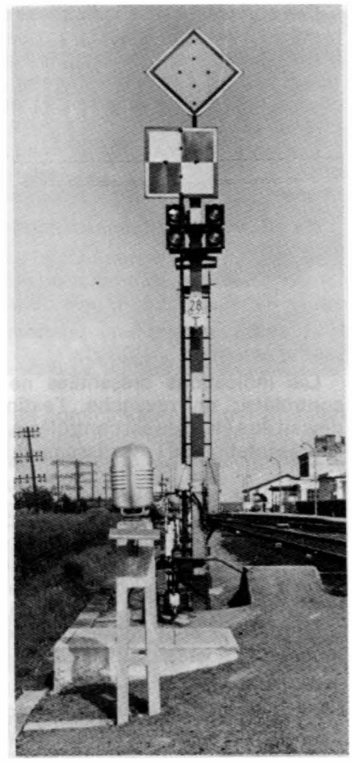


Fig. IX-5

Signal mécanique (*S.N.C.F.*)

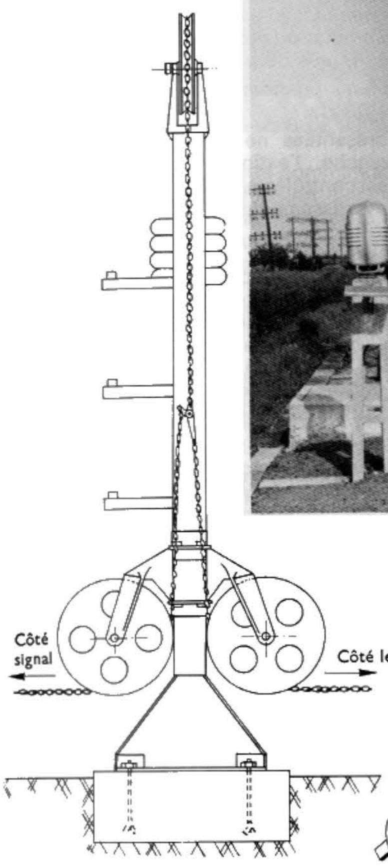


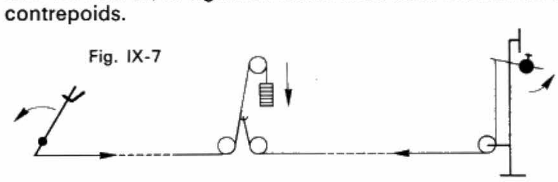
Fig. IX-6

Compensateur

position *fermeture* est la position horizontale de la palette, la position *ouverture* est la position oblique.

Les signaux mécaniques peuvent être commandés par une *transmission funiculaire* ou par une *transmission électrique* par l'intermédiaire d'un moteur. Les *transmissions funiculaires* sont constituées par un fil unique en acier galvanisé de 3 mm de diamètre guidé par des poulies montées sur des piquets supports, espacés en principe de 15 m. La transmission attaque le levier à contrepoids du signal. Elle est montée de façon telle qu'elle ouvre le signal en tirant, la fermeture étant obtenue par le contrepoids de rappel ; ainsi en cas de rupture, le signal se ferme de lui-même (application du principe de sécurité intrinsèque défini ci-dessus). Au-delà de 400 m, les variations de longueur de la transmission dues aux variations de température deviennent trop fortes et l'on intercale un *compensateur* (fig. IX-6) au milieu de la transmission. Malgré la présence du compensateur, qui inverse le mouvement de la transmission entre le levier de commande et le compensateur (fig. IX-7), le principe de sécurité intrinsèque est toujours respecté. Si une rupture se produit entre levier et compensateur, le crochet du compensateur, entraîné par le contrepoids, bascule et la deuxième partie de la transmission est libérée, le signal se ferme alors sous l'action de son contrepoids.

Fig. IX-7



Les leviers de commande des signaux sont généralement groupés dans un poste (d'aiguillage ou de cantonnement). La manœuvre par levier peut être complétée par un dispositif de fermeture automatique au passage d'un train sur une pédale agissant par l'intermédiaire d'un *appareil Aubine* (fig. IX-8). L'ouverture du signal ainsi fermé est obtenue par le levier après que celui-ci ait été placé en position de fermeture pour *confirmer* l'action de l'appareil Aubine.

Lorsque la longueur de la transmission d'un signal dépasse 1 500 à 2 000 m, on utilise la manœuvre par *moteur électrique de signal* (fig. IX-9). On retrouve les mêmes principes que dans la manœuvre mécanique : fermeture du signal par gravité (contrepoids) en l'absence de courant, possibilité de fermeture automatique du signal par pédale (électrique cette fois).

L'*éclairage des signaux mécaniques* est dans la quasi-totalité des cas assuré par des lampes électriques, installées dans de petites *unités lumineuses* du genre de celles utilisées en signalisation électrique et comportant chacune un verre coloré.

La source d'énergie est soit une batterie d'accumulateurs, si l'on dispose à proximité d'un secteur électrique permettant de la maintenir en charge, soit une batterie de piles de forte capacité (1 100 ou 2 000 Ah).

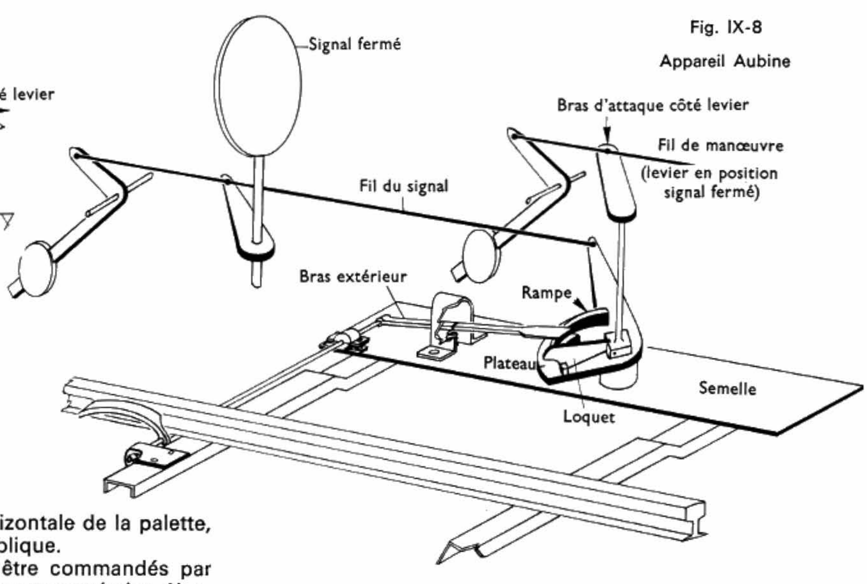


Fig. IX-8

Appareil Aubine

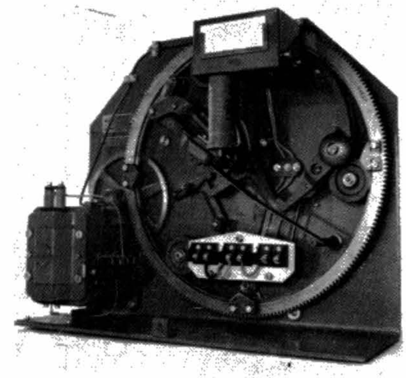


Fig. IX-9

Moteur électrique de signal (*Mors-S.N.C.F.*)

L'allumage de l'unité lumineuse de la coloration voulue est obtenue par un commutateur dont le mouvement de rotation est solidaire de celui du voyant du signal.

Malgré les précautions prises pour assurer la sécurité du fonctionnement d'un signal mécanique, il est indispensable de contrôler que celui-ci présente bien l'aspect commandé, au moins dans le cas d'une commande de fermeture. Ce contrôle est donné à l'aiguilleur par un voyant optique, mécanique ou lumineux, monté conformément à la figure IX-10 (dans le cas d'un sémaphore). Le commutateur utilisé est généralement commun avec celui d'éclairage, mais l'angulation des contacts utilisés est différente.

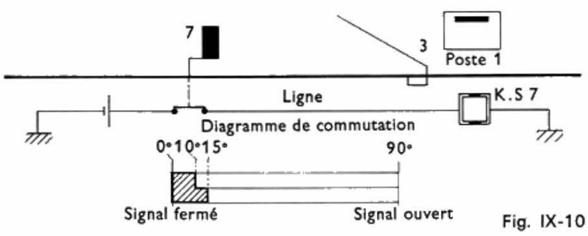


Fig. IX-10

Les *signaux lumineux* sont constitués par des panneaux qui groupent les indications de plusieurs signaux. Les feux d'un panneau sont hiérarchisés, c'est-à-dire que seuls sont présentés les feux correspondant à l'indication la plus impérative pour le mécanicien ; le cas échéant, deux indications présentant une valeur équivalente (avertissement et rappel de ralentissement) peuvent être présentées simultanément.

Les unités lumineuses peuvent être groupées sous forme de boîtes à feux. Elles sont entourées d'un écran dont la forme peut être allongée verticalement (panneau normal) (fig. IX-11) ou circulaire (panneau rond ; fig. IX-12). Les panneaux ronds ne portent que les indications de signaux à distance : avertissement, disque rouge (et voie libre).

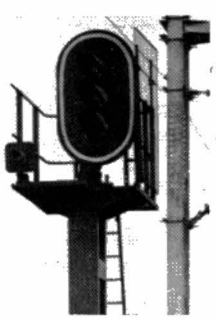


Fig. IX-11 — Panneau lumineux normal (*S.N.C.F.*)

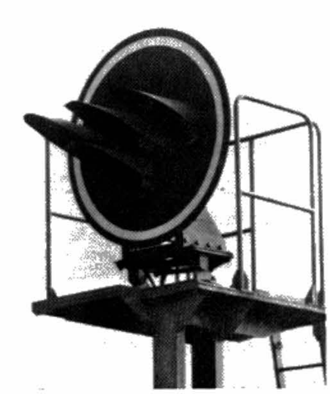


Fig. IX-12 — Panneau lumineux rond (*S.N.C.F.*)

Le panneau peut être complété (hors écran) par un petit feu blanc (c'est l'œilleton de franchissement) et par des plaques portant des inscriptions.

Ces compléments d'indications sont destinés à renseigner le mécanicien arrêté devant un panneau présentant un signal d'arrêt sur les conditions dans lesquelles il peut franchir le signal : de lui-même, en marche à vue (cas d'un œilleton allumé ou d'une inscription *F*) ou sur ordre écrit ou téléphoné.

Les lentilles des unités lumineuses (ou des boîtes à feux) ont des diamètres de 220 ou de 160 mm. Les lampes utilisées ont une puissance comprise entre 3 W et 25 W.

Chaque feu est alimenté séparément :

— soit en commande locale, par une batterie d'accumulateurs de 8 V, la commutation étant obtenue par des relais situés dans une guérite près du panneau ;

— soit, plus rarement, directement du poste par un courant alternatif 24 V-400 Hz.

Les indications présentées ne sont généralement pas contrôlées ; en revanche, l'extinction d'une lampe qui devrait être allumée est contrôlée par un relais qui commande la présentation de l'avertissement sur le panneau précédent.

2.2. Les appareils de voie. — Les appareils de voie (branchements, traversées, jonctions) comportent des parties fixes qui assurent la continuité du roulement des roues et des parties mobiles, les aiguilles. Les organes de *commande* et d'*immobilisation* (calage ou verrouillage) font partie des installations de sécurité.

Les *verrous* sont utilisés dans le cas d'aiguilles prises *en pointe* à une vitesse supérieure à 40 km/h.

On distingue :

— les verrous *indépendants*, c'est-à-dire manœuvrés par une transmission différente de la transmission de commande de l'aiguille. Ils agissent sur la tringle qui relie les deux aiguilles ;

— les verrous *automatiques* manœuvrés par la même transmission que l'aiguille ; en fait, on utilise les verrous Carter-Coussinet. Leur manœuvre se décompose en trois temps (fig. IX-13) :

1er temps. — Déverrouillage de l'aiguille collée (et décalage de l'autre aiguille).
2e temps. — Translation des aiguilles.
3e temps. — Verrouillage et calage des aiguilles.

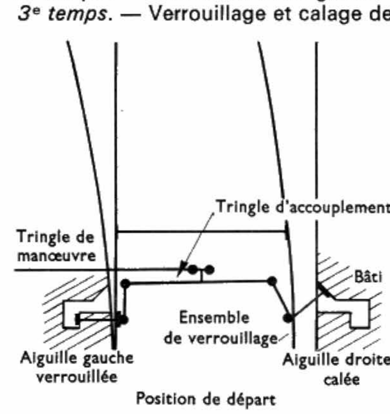
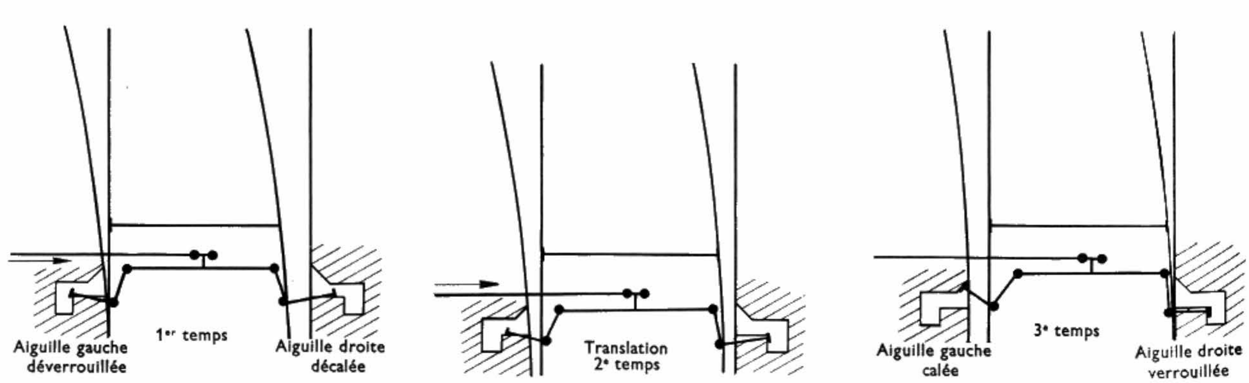


Fig. IX-13

Fonctionnement des verrous Carter-Coussinet



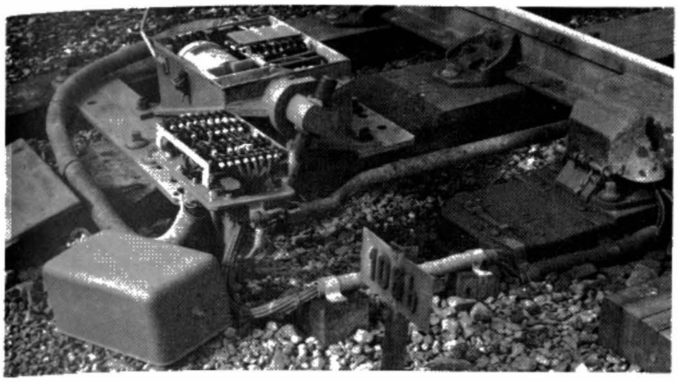


Fig. IX-14

Mécanisme de manœuvre électrique d'aiguille (*C.S.E.E.-S.N.C.F.*)

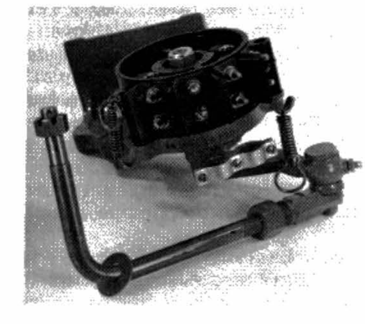


Fig. IX-16 — Contrôleur Paulvé (sans son couvercle) (*S.N.C.F.*)

Les aiguilles peuvent être commandées par transmission mécanique ou par transmission électrique. Dans ce deuxième cas, si un verrou est nécessaire, on utilise généralement le verrou Carter-Coussinet.

Les transmissions mécaniques peuvent être *rigides* ou *funiculaires*. Ces dernières transmissions sont analogues aux transmissions de signaux mais comportent deux fils (de 4 mm de diamètre) au lieu d'un seul. Les transmissions rigides sont constituées de tubes creux en acier de 33-42 mm, supportés tous les 3 m par des guides. Leurs variations de longueur sous l'influence des variations de température doivent être compensées soit par des *renvois* montés en compensateurs (c'est-à-dire avec changement du sens de déplacement de chaque côté du renvoi), soit par des *compensateurs* à crémaillères.

Si la commande de l'aiguille est faite sur place ou à courte distance, on utilise des *leviers à contrepoids* ou des *leviers à crans* (avec tringle élastique à ressort si l'aiguille doit pouvoir être *talonnée*, c'est-à-dire être prise en talon par les trains sans que l'on soit obligé de la mettre au préalable dans la bonne position).

Si la commande de l'aiguille est faite à distance (généralement d'un poste), on utilise des leviers à demi-révolution, qui utilisent mieux l'effort de l'aiguilleur.

Les transmissions électriques agissent par l'intermédiaire d'un *mécanisme de manœuvre électrique d'aiguille* (fig. IX-14), plus couramment appelé moteur d'aiguille. Le moteur électrique proprement dit est, soit un moteur série à courant continu, soit un moteur asynchrone triphasé.

Le moteur électrique entraîne, par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse et d'un dispositif à friction, limiteur de couple, un bras d'attaque lié à la tringle de manœuvre de l'aiguille; ce bras d'attaque comporte un dispositif de calage en fin de course.

Un commutateur assure la coupure des contacts de fin de course et le contrôle de la position du moteur.

La commande du moteur est dite *directe*, si le circuit d'alimentation (coupé et établi par un relais *rupteur*) part du poste, et *relayée* si l'alimentation est faite au voisinage de l'aiguille. Dans le premier cas, la commande ne part pas directement du levier mais d'un relais communément dénommé *C.Ag* qui peut occuper une position droite et une position gauche. Si l'aiguille n'a pas obéi dans un délai normal, un relais de commande perdue coupe de toute façon le courant.

Dans le montage simplifié, dit « à quatre fils », il n'y a pas de contacts de fin de course et le moteur continue à tourner sur friction jusqu'à coupure de courant par le relais de commande perdue.

En cas de défaillance de la commande électrique, la manœuvre de l'aiguille peut être obtenue par un dispositif de secours : levier ou manivelle.

Le *contrôle* est encore plus important que pour le fonctionnement des signaux car on ne peut utiliser ici l'action d'un contrepoids.

On contrôle donc :

— la position réelle des lames d'aiguilles ;

— le fonctionnement des verrous s'il y en a ;

— la position et le calage du moteur le cas échéant; on compare les positions ainsi contrôlées avec celles des organes de commande (levier ou *C.Ag*).

Ce contrôle peut être *indicatif* pour l'aiguilleur (tintement d'une sonnerie d'entrebâillement pendant la course de l'aiguille, allumage d'un voyant lumineux sur le tableau de contrôle optique du poste). Le plus souvent il est *impératif*, c'est-à-dire qu'il interdit matériellement l'ouverture du signal qui protège l'aiguille, par l'intermédiaire d'un relais communément dénommé *K.Ag*. La figure IX-15 illustre les principes qui précèdent dans le cas d'un aiguillage à commande électrique directe.

Le contrôle du collage des lames d'aiguillage est fait au moyen d'un contrôleur de lame, type Paulvé. Ce contrôleur (fig. IX-16) est fixé sur le rail sur lequel s'appuie l'aiguille.

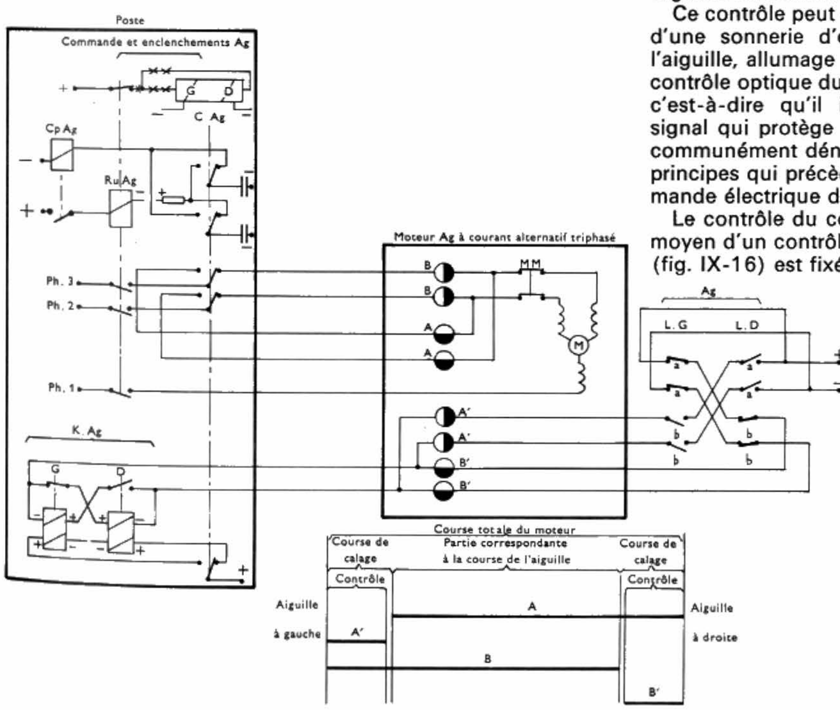


Fig. IX-15

Commande et contrôle d'un aiguillage par commande directe

Une ferrure est boulonnée à l'extrémité de la lame d'aiguille; une biellette réglable en longueur relie ferrure et contrôleur. Tout déplacement de la lame d'aiguille provoque une rotation des cames du contrôleur, cames qui commandent l'ouverture et la fermeture des contacts. Les contacts d'application sont établis du collage de la lame jusqu'à une ouverture en pointe de 5 mm; à 6 mm d'ouverture, ils doivent être coupés.

Les verrous (de tringle ou Carter-Coussinet) comportent des contrôleurs de principe voisin.

2.3. Enclenchements entre leviers. — Les signaux et aiguillages ne doivent être actionnés que si leur manœuvre peut s'effectuer sans danger pour les circulations. Dans les cas simples, ce résultat peut être obtenu par l'application des règlements de sécurité et des consignes locales. Lorsque les installations deviennent plus complexes, il devient nécessaire de rendre effective, par des moyens matériels, l'interdiction d'actionner un appareil dont la manœuvre serait dangereuse. Ces moyens matériels sont les *enclenchements*.

En signalisation mécanique, les enclenchements sont réalisés entre leviers. En signalisation électrique, ils peuvent aussi être réalisés entre appareils et leviers. Mais nous verrons que dans les postes électriques modernes, les boutons de commande sont libres; les enclenchements sont remplacés par des conditions électriques qui empêchent les commandes d'aboutir si les conditions de sécurité ne sont pas remplies.

Les enclenchements intéressant deux leviers sont appelés *enclenchements binaires*. Parmi ceux-ci on distingue :

— Les *enclenchements d'ordre* qui obligent à manœuvrer les leviers dans un certain ordre.

Exemple : L'ouverture de l'avertissement annonçant un carré doit être faite seulement après l'ouverture du carré. *Réciproquement*, la fermeture du carré doit avoir lieu après celle de l'avertissement (de façon qu'un mécanicien ne risque pas de trouver un carré fermé non annoncé).

— Les *enclenchements de simultanéité* qui interdisent à deux leviers d'occuper simultanément une position déterminée (1).

Exemple : L'ouverture d'un carré protégeant une aiguille prise en talon si l'aiguille n'est pas placée dans la bonne position ou si le carré correspondant à l'autre position est ouvert.

— Les *enclenchements de direction ou de mouvement ou pendant la course.* Un levier ne peut être manœuvré que si l'autre est dans l'une de ses positions extrêmes, mais pas dans une position intermédiaire.

Exemple : Levier d'un carré protégeant une aiguille prise en pointe et levier de l'aiguille.

Les enclenchements intéressant plus de deux leviers sont appelés *enclenchements conditionnels*. Les enclenchements entre leviers voisins peuvent être réalisés dans les cas simples (enclenchements d'ordre) par toc, simple plaque de fer fixée sur un des leviers et venant s'appuyer sur l'autre. Dans les autres cas, on utilise une *table d'enclenchement* reliée aux leviers (ou à la contre-poignée qui cale le levier dans chacune des deux positions extrêmes) soit du type Stevens (fig. IX-17), soit par *grils* et *taquets* (fig. IX-18).

Dans ce dernier type de table, chaque gril est attelé à la contre-poignée d'un levier déterminé, par l'intermédiaire d'un système de tringles. Lorsqu'on actionne la contre-poignée pour débloquer le levier, le gril tourne d'une fraction de tour (environ 1/16) ; quand on rebloque le levier en fin de course, le gril tourne encore du même angle. Chacune des barres perpendiculaires aux grils, est entraînée par un taquet monté sur un des grils et porte des taquets d'enclenchement qui viennent ou non buter dans les autres grils suivant leur position sur la barre et la position de chaque gril. L'avantage du système est que les taquets d'enclenchement subissent uniquement les efforts sur les contre-poignées et non ceux exercés sur les leviers eux-mêmes.

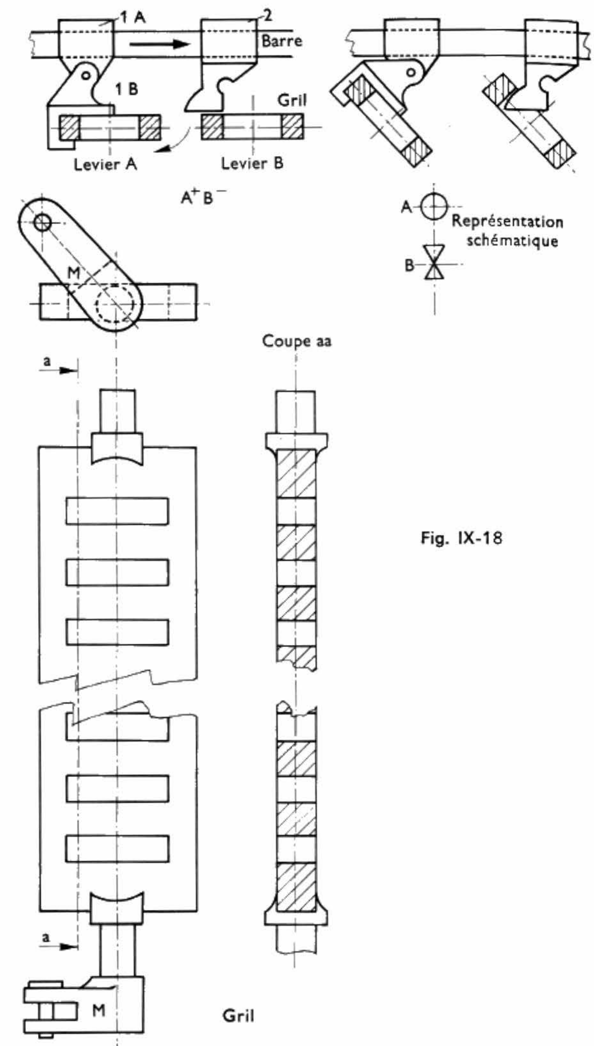


Fig. IX-18

Le fonctionnement des enclenchements Stevens se comprend de lui-même. Du fait de leurs pans coupés, les taquets sont à la fois *entraînés* par une barre et *enclencheurs* pour une autre barre. Les barres peuvent être entrainées soit par les contre-poignées, soit par les leviers eux-mêmes. Le système Stevens se prête facilement à la réalisation d'enclenchements conditionnels et peut même être utilisé dans ce but sur les tables à grils et taquets.

Les enclenchements entre un appareil et un levier sont réalisés électriquement.

Les principaux enclenchements de ce type sont :

— le *contrôle impératif d'aiguille* (V. § 2.2) ;

— l'*enclenchement d'aiguille* par zone isolée, qui interdit la manœuvre du levier de l'aiguille pendant l'occupation du circuit de voie de l'aiguille, donc interdit la manœuvre sous un train ;

— l'*enclenchement de transit*, qui empêche la libération des enclenchements d'aiguille relatifs à un itinéraire, à partir du moment où le train a franchi le signal commandant l'itinéraire (cet enclenchement fait intervenir les circuits de voie des différentes aiguilles de l'itinéraire) ;

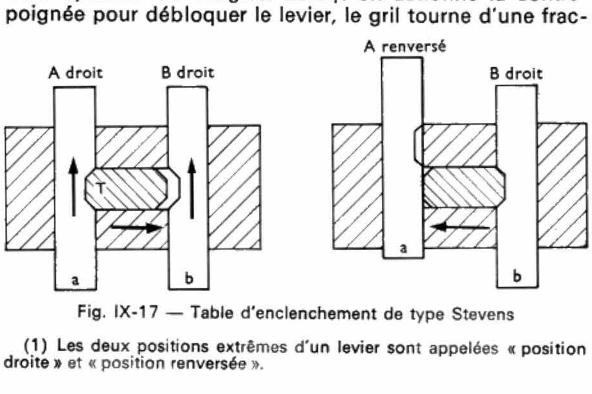


Fig. IX-17 — Table d'enclenchement de type Stevens

(1) Les deux positions extrêmes d'un levier sont appelées « position droite » et « position renversée ».

— *l'enclenchement d'approche*, qui empêche la fermeture d'un carré à partir du moment où le mécanicien a vu l'avertissement ouvert. (Cet enclenchement fait intervenir les circuits de voie compris entre un point situé 200 m au moins en amont de l'avertissement et le carré) ;

— les *enclenchements de nez à nez*, qui ont pour but d'éviter l'affrontement de deux mouvements de sens opposés. Ils font intervenir non seulement les carrés qui commandent les itinéraires en nez à nez mais aussi les circuits de voie situés entre ces deux carrés.

Tous ces enclenchements sont réalisés par des verrous électriques (fig. IX-19). Ce sont essentiellement des électroaimants dont l'armature entraîne un loquet qui, en l'absence de courant, pénètre dans l'encoche d'une pièce solidaire du levier, ou de la contre-poignée du levier, le levier pouvant être réduit à une manette (verrou-commutateur).

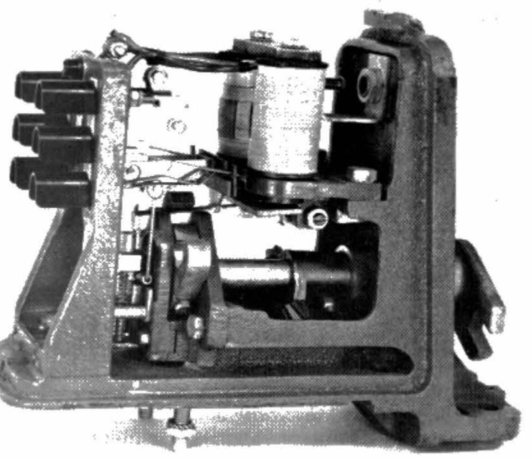


Fig. IX-19 — Verrou électrique (*S.N.C.F.*)

Conformément au principe de sécurité intrinsèque, tout manque de courant empêche la libération du levier. Toutefois, par mesure de sécurité supplémentaire (risque de rémanence ou de coincement mécanique) les verrous électriques comportent :

— un dispositif de décollage qui ramène mécaniquement le loquet en position de verrouillage lors du retour du levier dans la position correspondant à l'enclenchement (on a ainsi l'assurance que le verrou privé de courant ne reste pas en position de libération) ;

— des contacts électriques solidaires du loquet qui permettent de subordonner les actions électriques du levier (actions produites par un commutateur) au contrôle effectif du verrouillage.

Lorsque les leviers à enclencher sont éloignés, on peut utiliser également des enclenchements électriques (enclenchement de *poste à poste*). Mais dans les petites gares ou dans des zones peu fréquentées des gares plus importantes, on utilise des *enclenchements par serrures* (fig. IX-20). Les serrures sont installées sur chacun des leviers

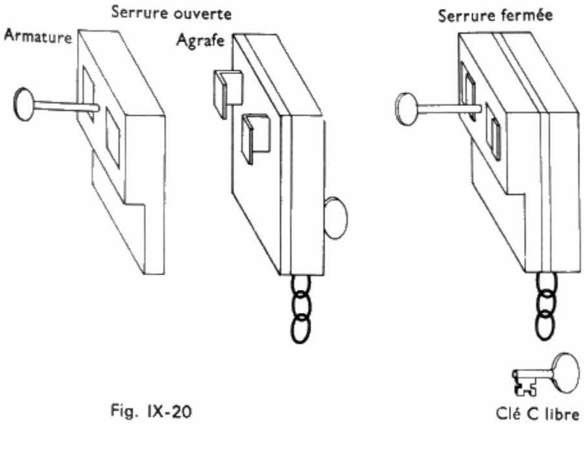


Fig. IX-20

à enclencher. Chaque serrure immobilise le levier quand la clé est libre et, réciproquement, la clé est prisonnière quand le levier est libre. Dans une gare donnée, les clés actionnant les serrures réalisant une relation d'enclenchement ne doivent pas permettre d'actionner les serrures des autres relations. Les clés (et les serrures correspondantes) se distinguent par le rouet, les saillies et le forage ; elles sont désignées par un indicatif qui symbolise les trois particularités ci-dessus. (Exemple : clé et serrure 1 *D* 3.)

Les serrures peuvent être :

— *À agrafes*. — Dans ce cas, elles comportent deux parties : une partie liée au levier (armature), une partie rendue solidaire d'un point fixe par une chaîne rivée (agrafe). La clé ne peut être libérée de la serrure que si l'armature et l'agrafe sont solidaires ; le levier est alors enclenché dans la position la plus voisine du point fixe et la clé peut libérer un autre levier (dont la serrure a le même indicatif).

— *À pène saillant*. — La serrure est alors en une pièce et la clé manœuvre un pène dont la saillie immobilise le levier dans la position convenable. La clé est libre si le pène est sorti, prisonnière si le pène est rentré, libérant le levier.

Il existe des serrures à deux et trois clés. En outre, dans les cas un peu complexes, on fait usage d'une *serrure centrale* constituée par des serrures élémentaires à une clé et par une petite table d'enclenchements (à barres croisées), l'ensemble étant monté à l'intérieur d'un boîtier.

Pour éviter des déplacements de clés sur des distances importantes, on utilise des *transmetteurs de clés* qui libèrent la clé d'une extrémité du transmetteur lorsque la clé de l'autre extrémité est prisonnière dans une serrure. Le transmetteur peut être mécanique (à transmission bifilaire) ; il est plus généralement électrique. C'est alors une sorte de verrou qui peut enclencher une clé — ou la libérer — au lieu d'enclencher un levier.

Ces transmetteurs électriques peuvent comporter à une extrémité (poste d'aiguillage) un verrou électrique proprement dit ; c'est le cas des autorisations de manœuvre, qui, en manœuvre locale, sont utilisés pour commander (par mesure d'économie ou de commodité) une aiguille protégée par les signaux d'un poste.

2.4. Pédales. — Les pédales ont pour but de donner une information sur le passage d'un train en un point déterminé de la voie. Elles sont surtout utilisées dans les installations d'annonce aux passages à niveau gardés ou dans les installations de signal automatique lumineux (passages à niveau automatiques), soit pour déclencher l'annonce (ou le fonctionnement du signal) à l'approche d'un train, soit pour faire cesser l'annonce (ou le fonctionnement du signal) après le passage du train au passage à niveau. Mais elles sont aussi utilisées dans les installations de signalisation proprement dites, par exemple dans certains systèmes de blocks, dans les enclenchements d'approche ou de transit, pour le fonctionnement des détonateurs de signaux lumineux ou pour annuler l'action de certains dispositifs (crocodiles notamment) au passage de trains circulant en sens inverse du sens normal.

Les pédales — ou détecteurs — peuvent être réalisées sous trois formes : mécaniques, électromécaniques, électroniques.

Les *pédales mécaniques* sont utilisées pour la fermeture automatique des signaux mécaniques dans l'appareil Aubine (V. § 2.1).

Les *pédales* ou *détecteurs électromécaniques* comportent :

— un bras actionné par le boudin des roues ;

— des contacts électriques ; contacts bas établis quand le bras est repoussé vers le bas par le passage de la roue ; contacts hauts établis quand le bras est revenu en position de repos ;

— un amortisseur hydraulique du bras (*dash-pot*) destiné, d'une part, à éviter le choc de chacune des roues d'un train sur le bras, d'autre part à assurer une durée de fermeture des contacts suffisante.

Il existe deux modèles de détecteurs électromécaniques (V. fig. IX-21 et IX-22). Certains sont orientés, c'est-à-dire

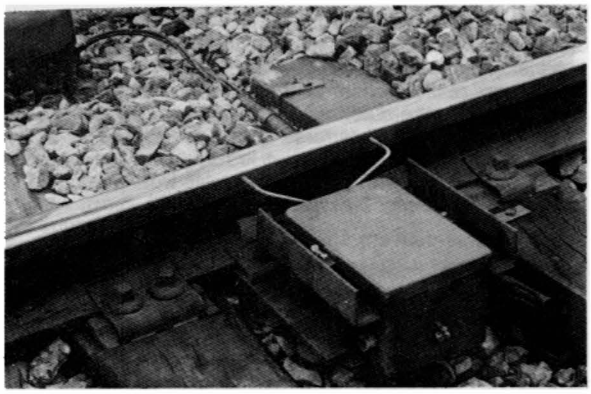


Fig. IX-21 — Détecteur électromécanique (*Silec-S.N.C.F.*)

actifs pour un seul sens de circulation et d'autres non orientés.

Les *détecteurs électroniques* ont l'avantage d'être soustraits aux efforts mécaniques qui, sur les lignes à grande vitesse, conduisent à une usure rapide des détecteurs électromécaniques.

Un détecteur électronique comporte un oscillateur fonctionnant à une fréquence assez grande (50 ou 39 kHz) et dont la charge est un circuit résonnant (inductance et condensateur en parallèle). L'impédance de ce circuit varie très sensiblement à chaque passage de roue et cela entraîne la disparition du signal de sortie (fig. IX-23). Les détecteurs proprement dits sont associés à un ensemble de traitement de l'information qui commande l'alimentation d'un relais : désexcitation ou excitation suivant que la pédale est négative ou positive.

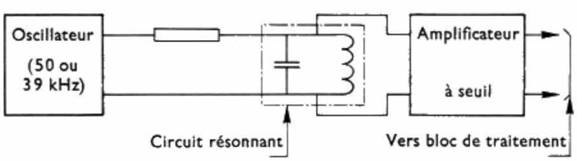


Fig. IX-23

On utilise quatre types de pétales :

— négatives simples ;
— négatives orientées ;
— positives simples ;
— positives orientées.

Pour les trois derniers types, le montage comporte deux détecteurs ; l'orientation est alors obtenue par un système séquentiel — dans l'ensemble de traitement — conçu pour ne donner une information que si les deux détecteurs sont abordés dans le sens actif (fig. IX-24).

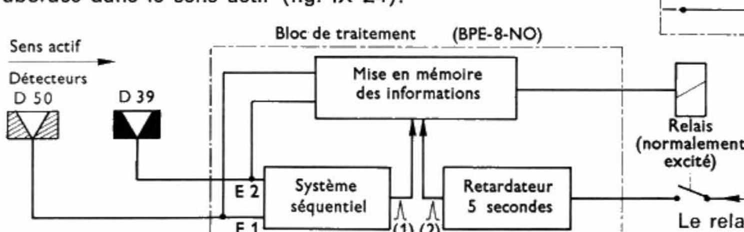


Fig. IX-24

2.5. Circuits électriques. — Alors que les transmissions mécaniques ont été traitées en même temps que les appareils qu'elles commandent : signaux mécaniques, appareils de voie, les circuits électriques méritent une étude à part. Les défauts qu'il convient de considérer dans l'application du principe de sécurité intrinsèque sont d'ailleurs un peu plus complexes : outre les défauts analogues à la rupture d'une transmission mécanique — rupture de fil, fusion de fusible —, il faut penser aux terres intempestives, aux « mélanges », aux phénomènes d'induction, etc.

Les circuits électriques des installations de sécurité comportent en principe (fig. IX-25) :

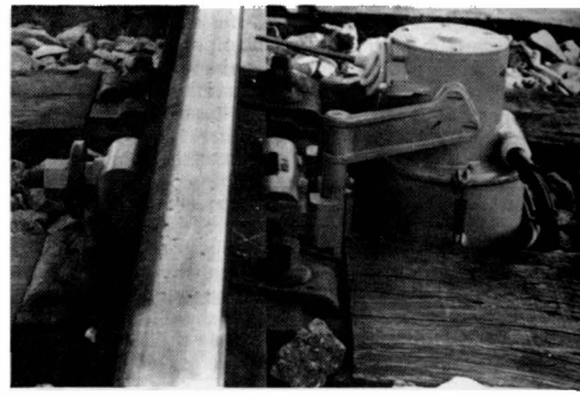


Fig. IX-22 — Détecteur électromécanique (*Paulvé-S.N.C.F.*)

— un générateur de courant ;
— un dispositif de protection ;
— un organe de commande (contact de relais, de commutateur, de pédale, etc.) ;
— un circuit de ligne ;
— un récepteur.

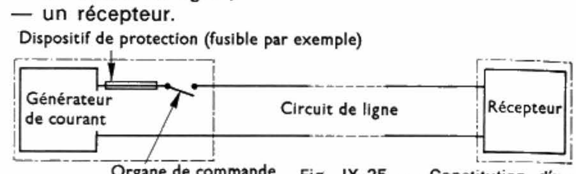
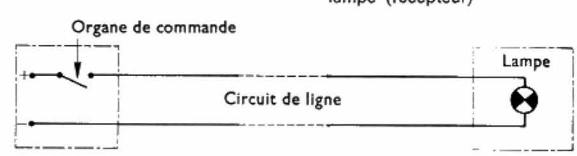


Fig. IX-25 — Constitution d'un circuit électrique d'une installation de sécurité

Dans le montage à *commande directe*, l'organe de commande agit directement sur le récepteur (fig. IX-26).

Fig. IX-26 — Commande directe sur la lampe (récepteur)



Dans le circuit à *commande relayée*, l'organe de commande agit par l'intermédiaire d'un *relais* électromécanique (fig. IX-27).

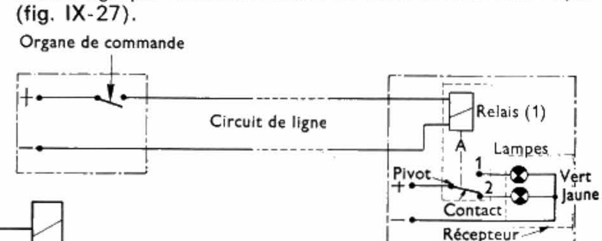


Fig. IX-27 — Commande relayée

Le relayage présente de nombreux avantages. Il permet notamment :

— la commande à distance d'un récepteur de puissance assez grande avec un faible courant en ligne (il suffit que ce récepteur puisse être alimenté à pied d'œuvre) ;

— la possibilité, avec un seul organe de commande et un seul circuit, de faire assurer plusieurs fonctions simultanées (grâce à un relais à plusieurs contacts) ;

— la réalisation de combinaisons complexes de conditions de sécurité.

Les circuits relayés sont montés de façon telle que la commande la plus *impérative* est obtenue par désexcitation du relais.

Les circuits électriques peuvent être réalisés de trois façons : avec retour par la terre, avec retour commun, et

en ligne bifilaire. Pour des raisons de sécurité (risque de terre, de mélanges, etc.), les deux premiers types de circuit sont très peu utilisés.

Les *circuits bifilaires* peuvent être à coupure unipolaire ou bipolaire. Les circuits à *coupure unipolaire* sont plus économiques (utilisation d'un faible nombre de contacts de relais) mais la présence accidentelle de deux terres risque d'entraîner le shuntage d'une (ou plusieurs) condition de sécurité (fig. IX-28). Ils sont utilisés à l'intérieur des

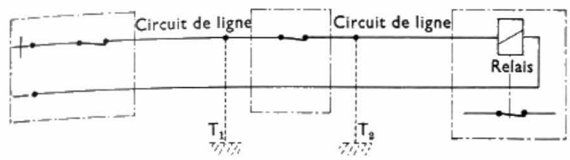


Fig. IX-28 — Circuit bifilaire à coupure unipolaire - Danger des terres accidentelles

postes où les conditions d'isolement et de protection mécanique des circuits sont bonnes. Les circuits à *coupure bipolaire* sont appliqués aux circuits extérieurs (dits circuits *en campagne*).

Dans tous les cas, le générateur de courant doit être disposé à un emplacement tel qu'il ne risque pas d'alimenter intempestivement le récepteur en cas de défaut sur la ligne (mise à la terre, court-circuit entre conducteurs). Le générateur doit donc être placé à proximité immédiate de l'organe de commande. Cela pourrait constituer une sujétion gênante lorsqu'il s'agit d'un circuit de contrôle, l'organe de commande étant un contrôleur d'aiguille ou de verrou d'aiguille (ou un commutateur de signal). Cependant, les semiconducteurs, permettant de convertir facilement du courant alternatif en courant unidirectionnel, il a été possible d'éliminer cet inconvénient. À proximité de l'appareil à contrôler on place une diode dans un circuit alimenté depuis le poste en courant alternatif. Le récepteur utilisé étant un relais insensible au courant alternatif, aucun risque de mélange, ni de terre n'est à craindre; c'est le montage dit *à diode en campagne* (fig. IX-29).

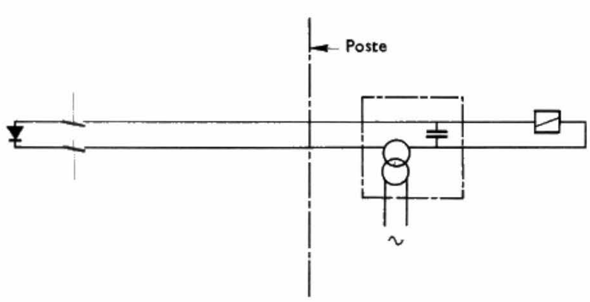


Fig. IX-29 — Montage dit « à diode en campagne »

Les circuits de signalisation peuvent être réalisés en lignes aériennes ou en câbles. La première solution, la moins coûteuse en général mais qui présente des risques d'incidents, n'est pratiquement utilisée que pour les annonces aux passages à niveau gardés ou automatiques et pour l'éclairage et le contrôle des signaux mécaniques, et seulement sur les lignes non électrifiées. Dans tous les autres cas, on utilise des câbles.

Sur les lignes électrifiées en courant continu, les câbles doivent être soustraits au phénomène de corrosion électrolytique dû à la présence de courants de retour dans le sol. À cet effet, on emploie des câbles à gaine extérieure en plastique.

Sur les lignes électrifiées en courant alternatif, les circuits doivent être protégés contre les tensions induites par la caténaire. On utilise à cet effet des câbles à gaine en plomb — ou en aluminium — dont la présence réduit notablement la valeur des tensions induites.

2.6. Relais. — Les relais ont deux fonctions essentielles :

— d'une part, comme nous l'avons vu, relayer les commandes et les contrôles à distance;

— d'autre part, réaliser les conditions complexes de sécurité, dont le système forme ce qui est appelé *une logique*.

Rappelons qu'un relais électromécanique est essentiellement (fig. IX-30) un *électroaimant* qui peut attirer une *armature* mobile solidaire de *contacts* électriques insérés dans des circuits de signalisation (V. t. 2, Relais).

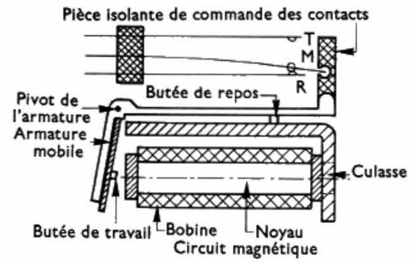


Fig. IX-30 — Relais. Lorsque la bobine est alimentée l'armature mobile pivote et le contact mobile M presse le contact de travail T

L'armature mobile peut occuper deux positions bien définies :

— la position de *repos* lorsque aucun courant ne passe dans le bobinage de l'électroaimant, les contacts établis dans cette position étant appelés *contacts de repos ;*

— la position de *travail* lorsque le bobinage de l'électroaimant est mis sous tension, les contacts établis dans cette position étant appelés *contacts de travail.*

On distingue trois grandes catégories de relais de signalisation : les relais de poste, les relais de ligne et les relais de voie.

Les *relais de poste* (fig. IX-31) sont des relais associés à des circuits courts qui réalisent essentiellement des fonctions logiques dans les postes. Dans les installations modernes, ils sont alimentés sous une tension continue de 24 V et consomment une puissance relativement grande (voisine de 2 W), ce qui contribue à leur sécurité de fonctionnement.

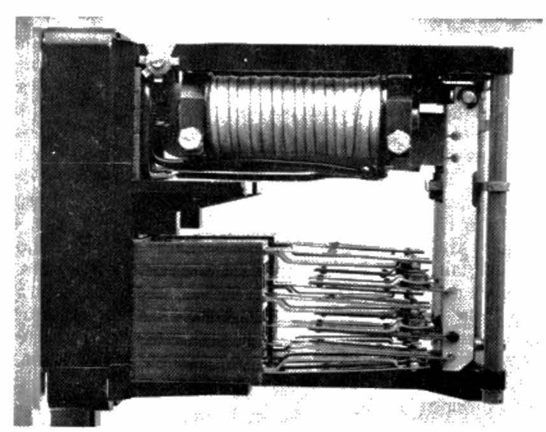


Fig. IX-31 — Relais de poste type NS 1 (*S.N.C.F.*)

Ces relais comportent un assez grand nombre de contacts (de 8 à 20). Pour permettre leur remplacement rapide sans risque d'erreur, ils sont maintenant munis systématiquement d'un connecteur automatique complété par un dispositif de verrouillage.

Pour réaliser certaines fonctions logiques, certains relais doivent être temporisés, soit à la fermeture, soit à l'ouverture, c'est-à-dire qu'il doit s'écouler quelques secondes entre le moment où le courant de commande est coupé ou établi et le moment où les contacts changent de position. Dans les installations modernes cette temporisation est obtenue en alimentant le relais par l'intermédiaire d'un *retardateur électronique* comportant des condensateurs et des résistances.

Parmi les relais de poste, on trouve des relais de types particuliers :

— les *relais basculeurs* ou *bistables* qui sont caractérisés par deux positions stables d'équilibre, cette stabilité étant assurée par un aimant permanent. Ces relais assurent notamment les commandes d'aiguilles (relais dits *C.Ag* — V. § 2.2) ;

— les *relais rupteurs*, conçus pour établir ou couper les circuits d'alimentation des moteurs d'aiguilles traversés par des courants assez grands.

Par opposition aux relais de poste, les *relais de ligne* sont placés à l'origine ou à l'extrémité d'une ligne plus ou moins longue (jusqu'à 4 km) et servent à relayer des organes de commande ou de contrôle.

Ils peuvent être alimentés en courant continu ou en courant alternatif. Ils peuvent comporter un ou deux éléments. Dans ce dernier cas, un des éléments est l'élément ligne, relié à la ligne et alimenté uniquement par elle. L'élément local est alimenté sur place par une batterie d'accumulateurs et son effet vient renforcer l'effet de l'élément ligne mais seulement si celui-ci est alimenté.

Les relais de ligne à courant continu sont alimentés soit sous 8 V, soit sous 24 V ; ils peuvent être à bornes (fig. IX-32) ou à connecteurs.

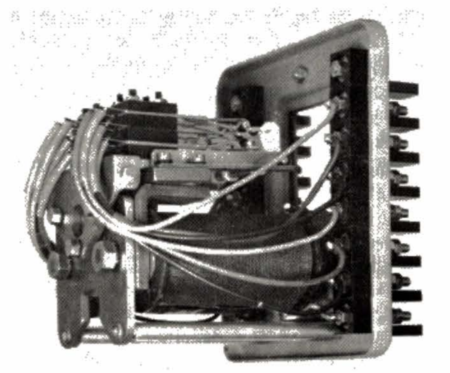


Fig. IX-32 — Relais de ligne type S 2 à bornes (*S.N.C.F.*)

Les relais de ligne à courant alternatif sont essentiellement utilisés sur les lignes électrifiées en courant continu. Ils peuvent être constitués par des relais à induction : l'armature ou rotor est une portion de disque en métal non magnétique se déplaçant entre les pièces polaires de deux bobinages distincts, l'élément de commande et l'élément local (fig. IX-33) ; les courants circulant dans ces deux bobinages sont volontairement déphasés l'un par rapport à l'autre à l'aide d'inductances ou de condensateurs. Les variations du flux alternatif produit par l'un des éléments donnent naissance à des courants induits dans le disque (courants de Foucault). Ces courants étant soumis au flux produit par l'autre élément, un couple électromagnétique s'exerce sur le disque et celui-ci se met à tourner. Ils peuvent être remplacés par des relais à courant continu alimentés par l'intermédiaire d'un transformateur-redresseur placé sous le même capot.

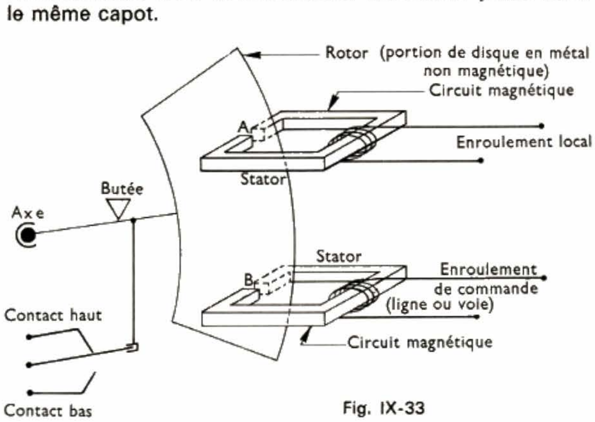


Fig. IX-33

Les *relais de voie* sont les relais associés aux circuits de voie que nous allons étudier plus loin. Ils sont de types variés car ils dépendent du type de ce circuit de voie. Ils ont toutefois une caractéristique commune : leur sensibilité (rapport de l'intensité du courant de désexcitation et de l'intensité du courant de travail) est nettement supérieure à celle des autres relais (0,7 au lieu de 0,2 à 0,3). En effet, à proprement parler, ils ne travaillent pas par « tout ou rien » car, lorsqu'un circuit de voie est occupé par un train, il peut subsister à la réception du circuit de voie un courant résiduel qui ne doit en aucun cas suffire pour maintenir le relais de voie excité.

Tous les relais dont il vient d'être question sont des relais dits *de sécurité*, qui sont conçus en fonction du principe de sécurité intrinsèque. Autrement dit, lorsque le bobinage de ces relais n'est pas alimenté, ou est alimenté par un courant de nature différente de celui prévu (alternatif au lieu de continu) ou d'intensité différente du courant normal, les contacts bas doivent être obligatoirement établis. Cette condition entraîne un certain nombre de dispositions constructives particulières : le rappel de l'armature en position repos doit toujours pouvoir se faire par gravité, les contacts de travail ne doivent pas pouvoir se souder sous l'influence du courant qui les traverse, etc.

Certains relais ne sont pas rigoureusement de sécurité. Ils sont utilisés, par exemple, dans les installations de *télécommande*, car, dans ce cas, les conditions de sécurité sont toujours réalisées en local, près des organes commandés. Ils sont aussi utilisés dans des fonctions pour lesquelles les ordres de commande sont subordonnés au contrôle de l'ouverture des contacts de travail de ces relais : d'où le nom de *relais contrôlés* donné à ce genre de relais.

Les relais que nous venons d'étudier sont des *relais magnétoélectriques ;* les fonctions qu'ils assurent sont réalisées par la fermeture ou l'ouverture de contacts entraînés par les armatures d'électroaimants. On utilise aussi des *relais statiques* qui ne comportent aucune pièce en mouvement. C'est le cas, par exemple, des éléments statiques de sécurité basés sur le principe de l'inductance saturable. Ils comportent un circuit magnétique fermé autour duquel sont bobinés un certain nombre d'enroulements. Un de ceux-ci est alimenté en permanence en courant alternatif à 400 Hz. Un autre enroulement, dit *enroulement de commande,* peut être ou non alimenté en courant continu. En l'absence de courant continu, l'ensemble se comporte comme un transformateur et l'on recueille sur le ou les enroulements de sortie du courant alternatif à 400 Hz. Si l'élément de commande est alimenté en courant continu, le circuit magnétique se sature et l'on ne recueille en sortie aucun courant. On réalise ainsi l'équivalent d'un relais à un (ou plusieurs) contact de travail. En ajoutant au dispositif ci-dessus un aimant permanent qui sature le fer, l'enroulement de commande le désaturant, on obtient l'équivalent d'un relais à contacts de repos. On peut aussi réaliser des relais basculeurs.

2.7. Les circuits de voie. — Alors que les pédales donnent une information ponctuelle sur la position d'un train, les *circuits de voie* détectent la présence d'un train à l'intérieur d'une zone de voie plus ou moins longue ; on les appelle aussi *zones isolées.*

Un circuit de voie est constitué (fig. IX-34) :

— d'une certaine longueur de voie délimitée en principe par des *joints isolants* (1) électriquement. Nous verrons

(1) Dans un joint isolant, les éclisses sont en matière isolante, ou recouvertes de matière isolante. Les boulons sont entourés de bagues isolantes et les abouts des rails sont séparés par un intercalaire isolant.

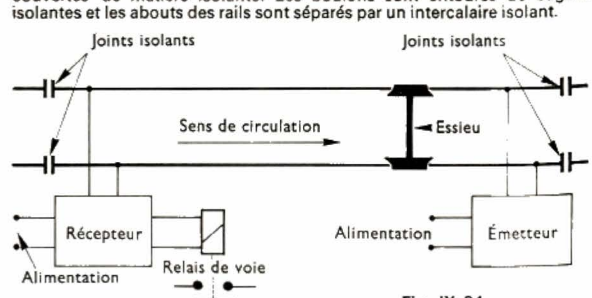
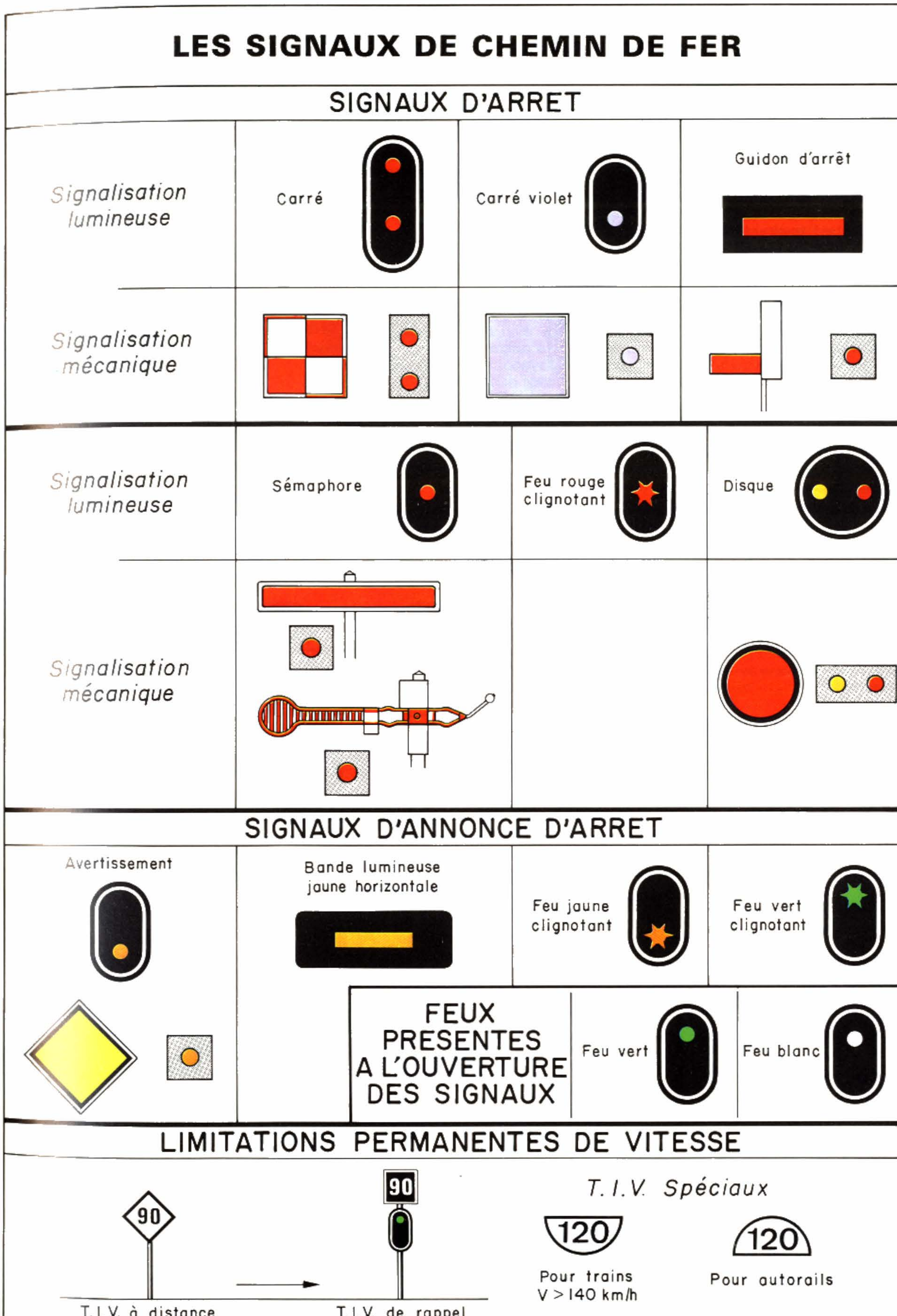
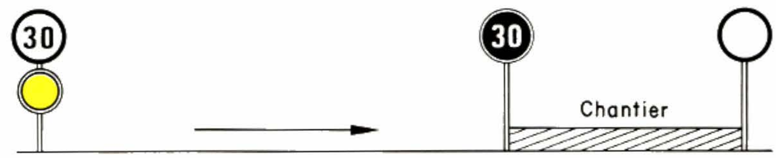


Fig. IX-34

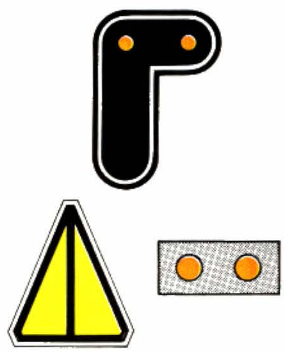

LES SIGNAUX DE CHEMIN DE FER
SIGNAUX D'ARRET
Signalisation lumineuse
Carré
Carré violet
Guidon d'arrêt
Signalisation mécanique
Signalisation lumineuse
Sémaphore
Feu rouge clignotant
Disque
Signalisation mécanique
SIGNAUX D'ANNONCE D'ARRET
Avertissement
Bande lumineuse jaune horizontale
Feu jaune clignotant
Feu vert clignotant
FEUX PRESENTES A L'OUVERTURE DES SIGNAUX
Feu vert
Feu blanc
LIMITATIONS PERMANENTES DE VITESSE
90
90
T.I.V. à distance
T.I.V. de rappel
T.I.V. Spéciaux
120
Pour trains V > 140 km/h
120
Pour autorails

LIMITATIONS TEMPORAIRES DE VITESSE

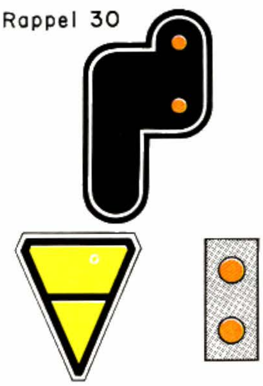


SIGNAUX DE RALENTISSEMENT

Ralentissement 30



Rappel 30



Ralentissement 60

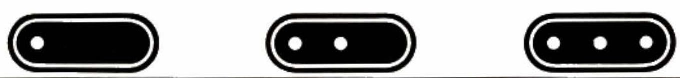


Rappel 60



SIGNAUX DE RENSEIGNEMENT

Indicateur de direction



Pancartes et tableaux à inscriptions diverses



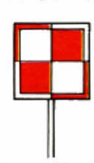
Garage — Impasse — Limite de manœuvre — Voie unique temporaire — Sifflez — Direction LAON — Dépôt

SIGNAUX DIVERS

Signal d'arrêt à main



Drapeau rouge



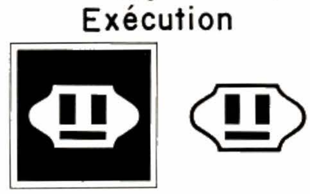
Jalon d'arrêt à damiers



Feu rouge d'une lanterne

Signaux "Coupez courant"

Exécution

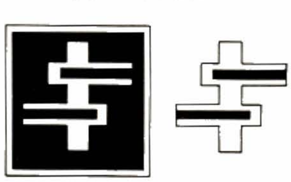


Fin de parcours

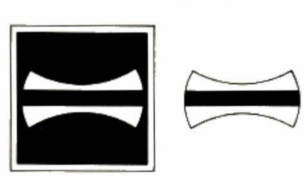


Signaux "Baissez panto"

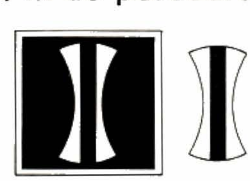
A distance



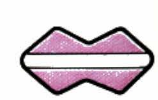
Exécution



Fin de parcours



Signal "fin de caténaire"



toutefois qu'il existe aussi des circuits de voie dits *sans joint* ou à joint électrique de séparation. Les deux files de rails (chacun des rails étant relié électriquement au suivant par une connexion électrique lorsqu'ils ne sont pas soudés) forment un circuit électrique bifilaire; chaque file est en effet isolée électriquement de l'autre, soit par la nature des traverses (traverses en bois), soit par le système d'attaches des rails sur les traverses (traverses en béton armé ou en acier). Outre la nature des traverses, la qualité du ballast de voie ainsi que les conditions météorologiques influent sur l'isolement du circuit. Dans un appareil de voie, on isole bien entendu les tringles de l'aiguille et le cœur sur la file déviée pour maintenir l'isolement des deux files (fig. IX-35) ;

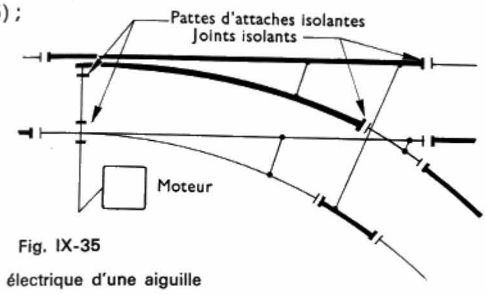


Fig. IX-35

Isolement électrique d'une aiguille

— d'un *émetteur* situé généralement à l'extrémité aval (par rapport au sens de circulation) mais pouvant aussi se situer au milieu de la longueur de voie;

— d'un (ou plusieurs) *récepteur* (le récepteur étant le plus généralement à l'extrémité amont) ;

— d'un relais de voie associé au récepteur.

Lorsque aucun essieu n'est situé sur le circuit de voie, le récepteur est alimenté par l'émetteur et alimente lui-même le relais de voie qui établit ses contacts de travail.

Lorsqu'un essieu pénètre sur le circuit de voie, il shunte celui-ci, son impédance étant nettement plus faible que celle du récepteur. Le récepteur n'est plus alimenté ou n'est alimenté que par un faible courant résiduel. Le relais de voie retombe et établit ses contacts de repos. Il en est de même en cas de discontinuité quelconque de l'ensemble du circuit (rail cassé ou défaillance d'un élément quelconque).

2.7.1. Les circuits de voie à courant continu. — Dans ce cas, l'émetteur est une batterie d'accumulateurs alimentant le circuit de voie par l'intermédiaire d'une simple résistance de réglage.

Le récepteur et le relais sont remplacés par un simple relais de voie à courant continu. Il n'y a qu'un seul récepteur possible.

Les polarités sont inversées d'un circuit de voie au suivant et de part et d'autre de chaque joint isolant (cas des appareils, par exemple), de façon à détecter le court-circuit de ceux-ci.

Les circuits de voie à courant continu ne peuvent être utilisés que sur les lignes non électrifiées. Toutefois, sur les lignes électrifiées en courant alternatif (25 kV-50 Hz), on peut utiliser des circuits de voie à courant continu isolés sur une seule file de rails, le retour du courant de traction se faisant par l'autre file. Cependant, comme on ne détecte pas la rupture éventuelle d'un rail sur la file non isolée, on n'équipe de cette façon que les circuits de voie courts (voisins d'une centaine de mètres, au maximum).

Sur les lignes parcourues par des locomotives Diesel, le train étant chauffé par courant électrique, il est nécessaire d'ajouter au circuit de voie à courant continu des dispositifs pulsateurs, avec filtre côté réception, de façon à éviter une réexcitation intempestive du relais de voie par le courant de retour du chauffage.

2.7.2. Les circuits de voie à courant alternatif. — Ces circuits de voie sont utilisés sur des lignes à courant continu (lignes à 1 500 V en France). Leur principe est semblable à celui des circuits de voie à courant continu, mais l'émetteur est ici un transformateur alimenté en courant à 50 Hz (secteur) et le récepteur un relais alternatif à deux éléments (le déphasage entre les deux éléments étant obtenu par l'impédance du circuit de voie qui alimente l'élément voie).

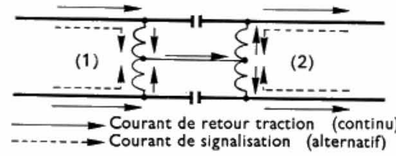


Fig. IX-36

(1) et (2) : deux circuits de voie différents

Pour permettre le retour du courant traction malgré la présence des joints isolants, on utilise des *connexions inductives* (fig. IX-36). Elles réunissent les deux files de rail de part et d'autre de chaque joint isolant. Les enroulements de ces inductances sont réalisés en gros fil à faible résistance; les points milieux des deux enroulements sont réunis par une connexion ce qui permet le passage du courant continu de traction.

En traction 25 kV - 50 Hz, on peut utiliser des circuits de voie à courant alternatif 83 Hz séparé du courant de traction par des connexions inductives à circuit résonnant. L'inconvénient de ce système est qu'il exige une alimentation spéciale pour les installations de signalisation.

2.7.3. Les circuits de voie électroniques à joints. — Plusieurs types de tels circuits de voie sont utilisés, le plus répandu en France étant le circuit de voie à *impulsions de tension*.

Il présente un double avantage :

— comme tous les circuits de voie électroniques, il utilise un courant de forme telle qu'il est facile de le séparer du courant continu comme du courant alternatif 50 Hz et de ses harmoniques. Il peut donc être utilisé quel que soit le type d'électrification ;

— il est alimenté sous une tension relativement grande (voisine d'une centaine de volts) suffisante pour « claquer » la mince couche d'oxyde isolante qui se forme à la surface du rail et donc pour que le shuntage par un essieu soit sûr même sur des portions de voie peu fréquentées. Mais pour éviter de mettre en jeu des énergies trop importantes, la tension n'est produite que suivant une succession d'impulsions très brèves, d'où le nom de ce circuit de voie.

L'émetteur est constitué essentiellement par un thyristor. Les caractéristiques du circuit de décharge provoquent des impulsions à une fréquence proche de trois par seconde. L'émetteur est alimenté en courant alternatif ou en courant continu. La forme de l'impulsion produite est donnée par la figure IX-37.

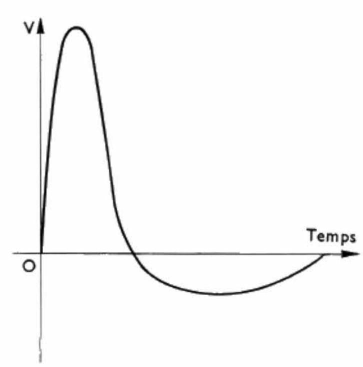


Fig. IX-37

Impulsion utilisée dans un circuit de voie électronique à joints

Le récepteur comporte un transformateur et un dispositif intégrateur (c'est-à-dire permettant le maintien d'un courant de sortie entre deux impulsions de tension).

Le relais de voie est particulier : c'est un relais différentiel à deux éléments (dont l'un à deux enroulements). L'un des enroulements est parcouru par un courant correspondant à l'alternance positive de chaque impulsion, les deux autres par un courant correspondant à l'alternance négative.

Le rapport du nombre de spires des enroulements et le montage magnétique sont tels que le relais ne s'excite que si le rapport des énergies de chaque alternance est sen-

siblement identique à celui de deux alternances de l'impulsion de l'émetteur.

La polarité de la première alternance de l'impulsion est inversée d'un circuit de voie au circuit de voie voisin, pour détecter le court-circuit du joint isolant, comme pour les circuits de voie à courant continu.

Sur les voies électrifiées en 1 500 V, on utilise des connexions inductives analogues à celle des circuits de voie à courant alternatif. Sur les voies électrifiées en 25 kV - 50 Hz, on utilise aussi des connexions inductives mais d'impédance plus faible. Les deux demi-enroulements sont bobinés de façon telle que leur flux favorise la circulation du courant de traction et contrarie celle du courant de signalisation. En outre, l'impédance est suffisamment faible pour la fréquence basse du courant de traction et très forte pour l'onde à front raide de l'impulsion de tension.

2.7.4. Les circuits de voie électroniques sans joint. — L'émetteur, équipé de circuits oscillants dont l'usage est courant en électronique, fournit des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont choisies de façon à être suffisamment différentes des harmoniques du courant de traction à 50 Hz. Un transformateur permet d'envoyer ces signaux dans la voie. Le récepteur filtre, amplifie et redresse le courant reçu.

Ces circuits présentent l'avantage de ne nécessiter ni joints isolants qui sont des points faibles de la voie, ni connexions inductives. Ils utilisent des relais de voie plus simples que les circuits à impulsion de tension. Ils facilitent moins le contact rail-roue que ceux-ci, tout en étant nettement meilleurs de ce point de vue que les circuits à courant continu. Ils permettent les montages avec émetteur central et plusieurs récepteurs (prises d'information). Cependant, leurs limites ne sont pas très nettement déterminées sur la voie et ils se prêtent mal à l'équipement des appareils de voie.

Bien qu'il n'y ait pas de problème de court-circuit de joint, pour éviter la réexcitation intempestive d'un récepteur par l'émetteur d'un circuit voisin, il est nécessaire que les circuits de voie successifs aient des fréquences différentes, ce qui entraîne plusieurs modèles d'appareillage.

Les systèmes les plus utilisés sont :

— Le *circuit de voie à circuits bouchons*. Sa fréquence relativement grande (1 600 à 2 800 Hz) limite sa portée (800 m), compte tenu de l'impédance de la voie.

— Le *circuit de voie à capteur d'intensité* qui n'a pas de limites précises. Sa fréquence plus basse (1 000 à 1 600 Hz) permet une portée plus grande mais, comme elle se situe dans la gamme audible, par induction elle peut donner lieu à des bruits de fond inacceptables dans les circuits téléphoniques aériens. Le récepteur est alimenté par un capteur inductif situé sous le rail. Ce système se prête particulièrement bien aux prises d'information intermédiaires et à la superposition avec les autres types de circuit de voie (avec relayage, s'il y a lieu, de part et d'autre d'un joint isolant).

— Le *circuit de voie court* se superpose, lui aussi, à n'importe quel autre type de circuit de voie, mais du fait de sa fréquence (8 700 Hz) et de la conception de son appareillage (émetteur et récepteur dans le même ensemble), il n'est utilisé que pour des circuits de voie d'une centaine de mètres au plus.

3. L'ESPACEMENT DES TRAINS

Le seul moyen pratiquement appliqué pour empêcher le rattrapage d'un train par un autre train circulant dans le même sens est le *cantonnement*. Il consiste à découper la voie en un certain nombre de tronçons ou *cantons*. À l'entrée de chaque canton, se trouve un signal qui est en principe un *sémaphore*. Ce sémaphore est annoncé par un *avertissement* (ou un disque rouge) situé à la distance d'annonce égale à la distance de freinage des trains les plus rapides de la ligne ; bien entendu la longueur de chaque canton doit être supérieure à cette distance. Le sémaphore d'entrée d'un canton doit être fermé dès que le train entre dans le canton ; il doit rester fermé tant que le train n'a pas libéré le canton et tant que le sémaphore suivant n'a pas été lui-même fermé (continuité du block) ou que

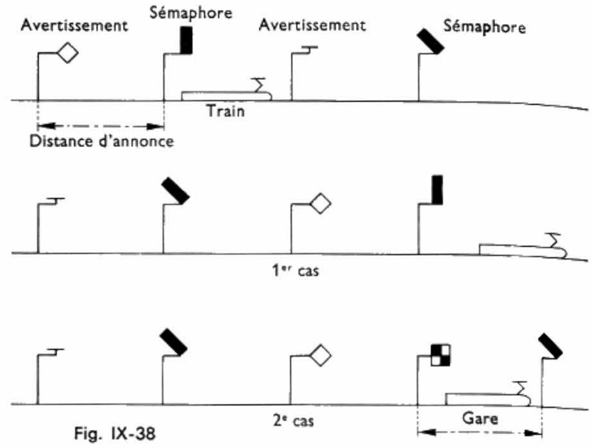


Fig. IX-38

le train n'est pas arrivé dans une gare et protégé par le carré d'entrée de cette gare (fig. IX-38).

L'avertissement est bien entendu toujours enclenché avec le sémaphore et, s'il y a lieu, avec le carré.

Si la manœuvre du sémaphore est libre, on a affaire au cantonnement proprement dit. Si la manœuvre du sémaphore est *enclenchée* par un certain nombre de conditions, le cantonnement est un *block*. Dans ce cas, si les signaux sont manœuvrés par un agent (appelé garde), le block est dit *manuel ;* si les signaux sont manœuvrés automatiquement par les trains eux-mêmes, le *block* est *automatique.*

3.1. Cantonnement téléphonique. — Les gardes situés à l'entrée de chaque canton — généralement un agent de chaque gare — sont reliés entre eux uniquement par téléphone. Au passage de chaque train, le garde vérifie que ce train est complet (présence du signal de queue), ferme l'avertissement et le sémaphore, annonce téléphoniquement le train par son numéro à la gare suivante et rend *voie libre* téléphoniquement à la gare précédente. Lorsqu'il reçoit lui-même voie libre de la gare suivante, il rouvre le sémaphore et l'avertissement. Les conversations téléphoniques sont notées sur un registre spécial.

Ce système est couramment utilisé sur les lignes peu fréquentées.

3.2. Block manuel. — Il existe plusieurs systèmes de blocks manuels ; un des plus répandus avant la guerre de 1939-1945 était le block Lartigue ; c'était un système électromécanique assez complexe.

Les systèmes mis au point depuis se caractérisent par un programme uniforme et par des systèmes de transmission électrique de poste de cantonnement à poste de cantonnement à l'abri des perturbations intempestives.

Comme en cantonnement téléphonique, au passage de chaque train, le garde vérifie que ce train est complet, ferme l'avertissement et le sémaphore et annonce le train au poste suivant ; mais ici, cette annonce se fait automatiquement en appuyant sur un *bouton d'annonce* qui déclenche au poste suivant un *voyant d'annonce.* De même, pour la reddition le garde appuie sur un *bouton de reddition* qui fait apparaître au poste précédent un *voyant de reddition.*

Le levier de chaque sémaphore est enclenché par un verrou électrique, qui est libéré par l'envoi d'*une émission de reddition* par le bouton de reddition du poste suivant.

Mais cette émission est elle-même subordonnée à un certain nombre de conditions :

— fermeture et blocage du sémaphore ;

— envoi de l'annonce à la gare suivante ;

— passage du train sur une pédale.

Dans certaines gares protégées par un carré d'entrée, ces deux premières conditions peuvent être remplacées par la fermeture du carré d'entrée de façon à pouvoir rendre voie libre si le train est garé ou s'il doit stationner un certain temps.

Pour que l'émission de reddition soit protégée des courants perturbateurs, fréquents surtout lorsque le circuit est aérien, cette émission est faite soit en courant polarisé codé, soit en courant vibré.

Dans le premier système, il y a trois fils entre deux postes. Chaque opération de block résulte d'une série de trois impulsions, chaque impulsion consistant en l'envoi d'un code formé de deux polarités différentes émises sur deux des trois fils, le troisième fil formant retour commun. Le dispositif récepteur identifie et enregistre les impulsions reçues et établit le circuit de commande correspondant au code émis.

Dans le système vibré il y a deux voies de chacune deux fils conducteurs. Les émissions d'annonce et de reddition sont réalisées au moyen de signaux produits par des vibreurs électromécaniques à lames (diapasons) et transmis par des contacts aux transformateurs d'adaptation reliés à la ligne. Les opérations de block de la voie 1 (annonce et reddition) utilisent la même fréquence de 111 Hz; celles de la voie 2 la fréquence de 166 Hz. La réception est assurée par des vibreurs électromécaniques à lames accordées. Lorsque celles-ci entrent en résonance, le relais récepteur intéressé est excité par l'intermédiaire d'un contact et d'un circuit intégrateur d'impulsions.

3.3. Block automatique à permissivité restreinte (B.A.P.R.). — Bien que ce block soit apparu historiquement bien après le block automatique lumineux (B.A.L.) ordinaire, nous en parlerons d'abord car, en fait, c'est un block manuel automatisé. Les différences essentielles avec le block manuel sont que les signaux sont des signaux lumineux manœuvrés automatiquement par les trains et que les circuits de transmission sont remplacés par la *ligne de voie*, sorte de circuit de voie long. Le programme appliqué est celui sans continuité d'annonce (puisqu'il n'y a pas d'annonce à la gare aval), le carré d'entrée de gare étant toutefois remplacé par un guidon d'arrêt, annoncé par un disque rouge.

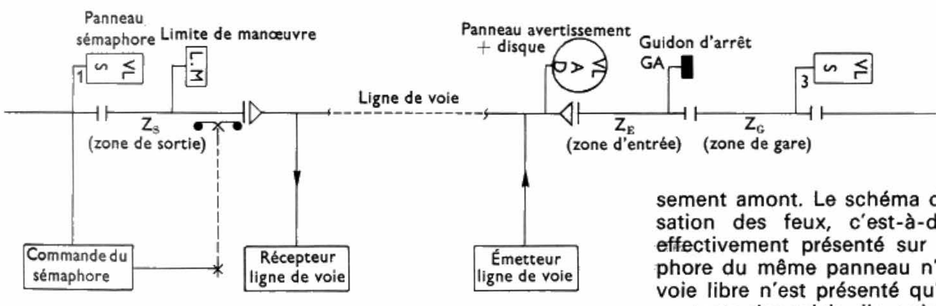


Fig. IX-39

À l'entrée du train dans le canton (fig. IX-39), le sémaphore n° 1 se ferme à l'attaque du circuit de voie (ou zone) de sortie Z_S et se bloque à la fermeture à l'attaque des pédales placées derrière le tableau limite de manœuvre (s'il s'agissait d'une manœuvre, le sémaphore ne se bloquerait pas; il pourrait alors se rouvrir après dégagement de Z_S par l'amont).

À la gare suivante, le disque rouge se présente sur le panneau rond à l'attaque de la zone d'entrée Z_E. À l'attaque de la zone de gare Z_G, le guidon se présente à son tour et dès que Z_E est libérée, l'émetteur de la ligne de voie fonctionne pendant cinq secondes environ. Si aucun essieu n'est resté sur la ligne de voie (ce qui correspond à la vérification du train complet en block manuel), le récepteur de la ligne de voie est excité et le sémaphore n° 1 se rouvre.

La protection du train continue à être assurée par le guidon, annoncé par le disque rouge. Lorsque les trois zones Z_E, Z_G et Z_S sont libérées, le guidon s'éteint et l'indication disque du panneau rond est remplacée par celle d'avertissement, annonçant le sémaphore n° 3.

Les manœuvres en gare sont exécutées sous la protection du guidon d'arrêt et du disque rouge, présentés automatiquement en libérant la clé d'une *serrure électrique*. La clé ainsi obtenue permet de libérer les serrures d'enclenchement des aiguilles.

La dénomination de ce block (à permissivité restreinte) se comprend aisément. En block manuel, lorsque le garde ne reçoit pas l'indication « voie libre » de la gare suivante dans les délais habituels, soit par suite d'un incident de circulation, soit par suite de dérangement du block, le garde peut autoriser le train arrêté devant le sémaphore à se remettre en marche : il donne un ordre écrit de *marche à vue* (c'est-à-dire à une vitesse telle qu'il puisse toujours s'arrêter sur la longueur de voie visible devant lui). En block automatique ordinaire, en l'absence de garde, le mécanicien est autorisé à remettre en marche *de lui-même* après avoir été arrêté devant un sémaphore fermé, en respectant bien entendu la marche à vue. Le block est pour cela qualifié de *permissif*.

En block automatique à permissivité restreinte, compte tenu de la longueur des cantons généralement nettement plus grande qu'en block automatique ordinaire, il peut y avoir inconvénient à laisser le mécanicien s'engager de lui-même en marche à vue en canton présumé occupé. Dans ce block, le mécanicien arrêté devant un sémaphore doit entrer en relation téléphonique avec le *régulateur* (c'est-à-dire l'agent qui surveille à distance le trafic de la ligne) et ne franchir le sémaphore que sur ordre de celui-ci. Cette *permissivité restreinte* est précisée par une plaque *F* (franchissable) et une plaque *PR* situées en bas de la cible du panneau portant le sémaphore.

3.4. Block automatique lumineux (B.A.L.). — Dans ce block automatique l'avertissement d'un sémaphore est porté par le même panneau que le sémaphore du canton précédent. C'est donc un block à cantons courts : 1 500 à 2 000 m (exceptionnellement 2 200 ou 2 300 m). Nous venons de voir que cette caractéristique entraîne la permissivité du block.

Le principe de fonctionnement est simple (V. fig. IX-40). Le feu de sémaphore est alimenté à travers un contact bas du relais de voie du circuit de voie située à l'aval du panneau. Un autre contact bas du même relais coupe un circuit alimentant le relais de commande *C.A.* de l'avertissement amont. Le schéma de câblage réalise la hiérarchisation des feux, c'est-à-dire que l'avertissement n'est effectivement présenté sur un panneau que si le sémaphore du même panneau n'est pas présenté, et le feu de voie libre n'est présenté qu'en l'absence d'autre feu. Des contacts des relais d'avertissement et de voie mettent en charge le crocodile avec la polarité voulue. Un relais de contrôle de courant *Ex. S.A.V.L.* en retombant peut couper la commande d'avertissement du panneau précédent, réalisant ainsi l'annonce du panneau éteint. Ce dernier peut être repéré la nuit par l'allumage d'un petit œilleton blanc. Cet œilleton a un autre usage sur les panneaux susceptibles de présenter les feux du carré. Il est en effet éteint lorsque le carré est effectivement présenté et allumé pour les autres feux, ce qui évite de confondre un sémaphore et un carré dont un feu est éteint.

Si le principe du block lumineux est simple, sa réalisation est assez onéreuse du fait notamment du grand nombre de cantons et de l'importance de la câblerie (on n'utilise jamais de circuits aériens à cause du risque de réalimentation du circuit de commande de l'avertissement, qui est l'indication la plus importante). En revanche, il présente l'avantage de permettre un débit important (qu'on peut encore augmenter par un block à quatre aspects avec utilisation du préavertissement) et de grandes vitesses (jusqu'à 200 km/h) en utilisant la préannonce et la répétition par balise.

Un des problèmes importants du block automatique lumineux est son alimentation. Si les circuits de voie sont à courant continu ou électroniques, on peut parfois se contenter d'une alimentation par le secteur É.D.F. — avec batteries d'accumulateurs en tampon et avec redresseur.

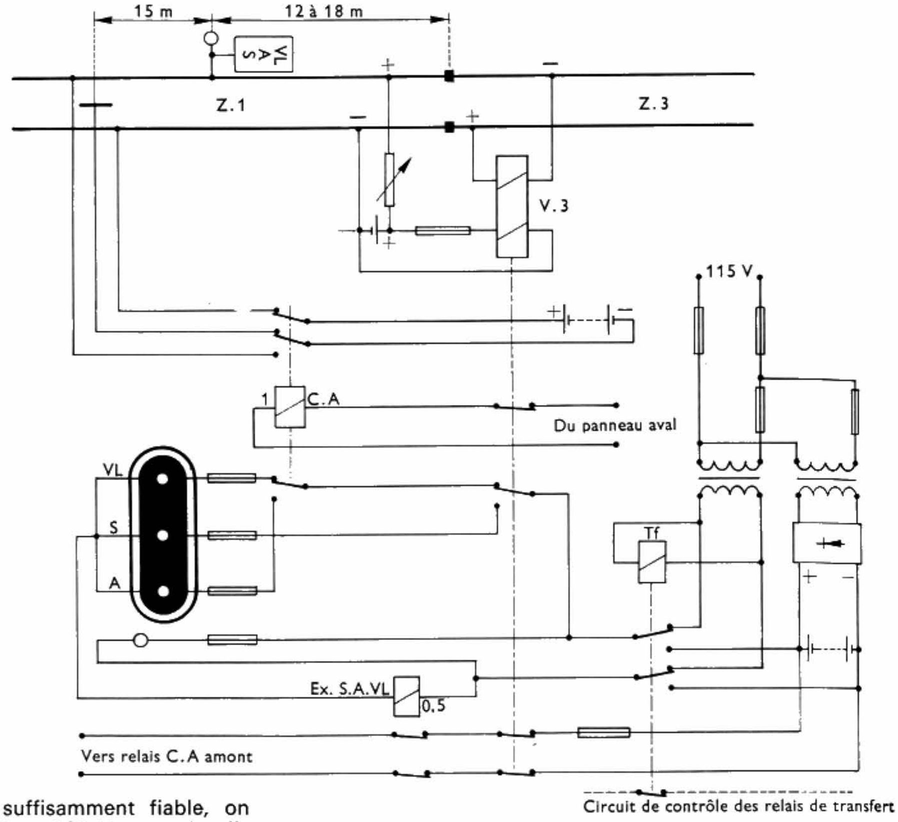


Fig. IX-40

Si le secteur É.D.F. n'est pas suffisamment fiable, on utilise un feeder (3 200 V triphasé ou 380 V monophasé). Ce feeder alimente un certain nombre de postes de transformation, qui distribuent le courant en basse tension aux guérites de signalisation dans un rayon de 200 à 300 m.

Si les circuits de voie sont à courant alternatif, il faut recourir à deux feeders, l'un normal, l'autre de secours.

4. LES POSTES

Les postes d'aiguillages sont constitués par le groupement des organes de commande d'un certain nombre d'aiguilles et des signaux protégeant ces aiguilles.

Les aiguilles peuvent être celles d'un embranchement particulier, d'une bifurcation, d'une partie de gare ou d'une gare complète, ou d'un ensemble de deux ou plusieurs des catégories ci-dessus.

Le poste est appelé :

— *mécanique* si les aiguilles — ou, du moins, la plus grande partie d'entre elles — sont à commande mécanique ; les signaux peuvent être à commande mécanique ou électrique ;

— *électromécanique* si les aiguilles — ou du moins la plus grande partie d'entre elles — sont à commande électrique par leviers enclenchés (mécaniquement et électriquement) ; les signaux sont également à commande électrique ;

— *électrique à leviers d'itinéraires* si les aiguilles d'un itinéraire et le signal (panneau lumineux) protégeant cet itinéraire sont commandés par un seul levier ; les enclenchements sont mécaniques et électromécaniques ;

— *électrique tous relais* si les aiguilles d'un itinéraire et le signal protégeant cet itinéraire sont commandés par un (ou deux) organe libre (bouton généralement), les conditions de sécurité étant assurées uniquement par des contacts de relais.

Si le poste comporte des signaux lumineux, ce qui est le cas de loin le plus fréquent, ces signaux assurent à la fois les fonctions d'espacement (cantonnement, V. § 3) et les fonctions de protection des mouvements « transversaux » (prises en écharpe, nez à nez, protection des aiguilles non collées). Si, en outre, le poste est dans une zone de block automatique, celui-ci assure le cantonnement sans autre intervention des dispositifs du poste que la sélection des circuits de voie intervenant dans la présentation du sémaphore selon la position des aiguilles, ainsi que la sélection de l'avertissement annonçant le sémaphore.

Dans les deux cas, les organes de commande du panneau assurent également d'eux-mêmes (sans intervention des organes du poste) la hiérarchie des feux. Un seul feu peut être présenté effectivement, le plus impératif pour le mécanicien (sauf dans le cas de l'avertissement et du rappel de ralentissement qui peuvent être présentés simultanément, l'un n'étant pas plus impératif que l'autre).

Lorsqu'un panneau est inclus dans le système de protection d'un poste, il est susceptible de présenter les feux du carré. Le carré n'étant franchissable que dans des cas très spéciaux (et seulement sur ordre écrit — ou message téléphoné de l'aiguilleur), la plaque *F* (franchissable) des panneaux de pleine voie est remplacée ici par une plaque NF (non franchissable). L'œilleton (V. § 2.1 et 3.4), éteint lorsque le carré est commandé, est allumé pour tous les autres feux, autorisant notamment le franchissement du sémaphore malgré la plaque NF.

4.1. Les postes mécaniques. — Il existe encore un assez grand nombre de postes mécaniques, de types variés. Les postes construits depuis la deuxième guerre mondiale sont du type « mécanique 45 » (fig. IX-41).

Les postes mécaniques comprennent :

— une batterie de grands leviers (à demi-révolution) pour les commandes mécaniques ;

— une batterie de petits leviers pour les commandes électriques ;

— une table d'enclenchements à grils, barres et taquets, chaque gril étant actionné par la contre-poignée des grands leviers ou directement par les petits leviers ; la table d'enclenchements est généralement située au même niveau que les batteries de leviers ;

— des commutateurs électriques entraînés par les grils ; ils assurent les commandes électriques et les sélections des circuits électriques de contrôle ;

— des verrous électriques qui assurent les enclenchements électriques des leviers et qui agissent soit directement

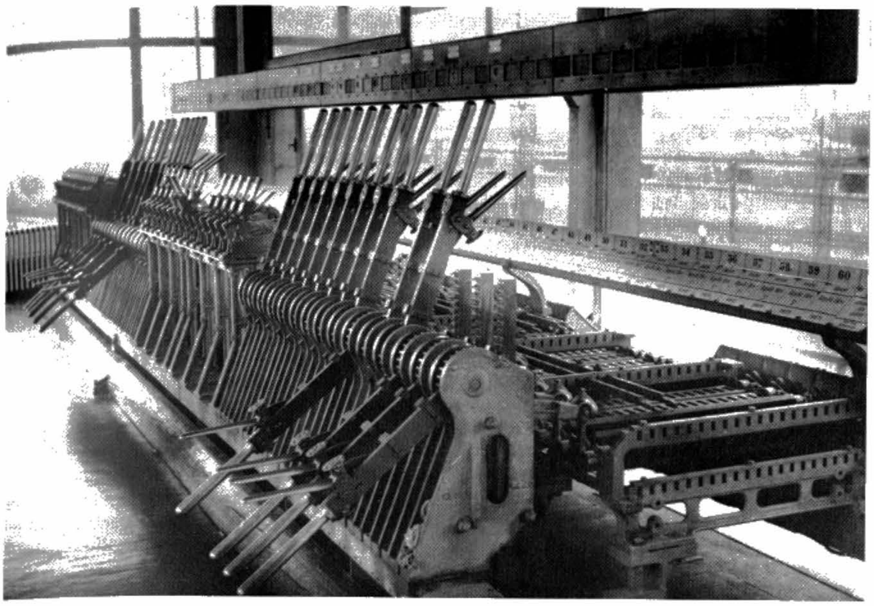


Fig. IX-41 — Poste mécanique 45. Vue intérieure (*S.N.C.F.*)

sur les contre-poignées, soit par l'intermédiaire des grils (ils sont alors groupés avec les commutateurs) ;

— des renvois de mouvement et des sorties de postes pour les transmissions mécaniques (rigides ou funiculaires), généralement au niveau du sol, la salle des leviers étant au niveau d'un premier étage.

La capacité maximale d'un tel poste est de soixante-dix leviers. De toute façon, sa zone d'action est peu étendue (quelques centaines de mètres, du fait des transmissions mécaniques), ce qui en est le principal inconvénient.

4.2. Les postes électromécaniques. — Dans les postes dits *électromécaniques unifiés*, la rangée des leviers — grands et petits — du poste 45 est doublée d'une rangée de petits leviers spéciaux, situés au-dessus et deux fois plus serrés. La capacité d'un tel poste atteint au maximum cent quatre-vingts leviers. La table d'enclenchement — verticale — est du type Stevens.

Les *postes électriques à leviers individuels* (*P.E.L.I.*) sont des postes électromécaniques comportant uniquement des petits leviers avec table Stevens et verrous miniaturisés. Ils sont destinés, du moins les postes à faible capacité (15 ou 30 leviers), à être placés dans le bureau du Chef de sécurité d'une gare de faible importance.

Le poste *P.E.L.I.* se présente comme un meuble dont la partie supérieure forme un pupitre incliné, situé à 1,20 m du sol, où sont situés les leviers disposés sur trois rangées horizontales (fig. IX-42).

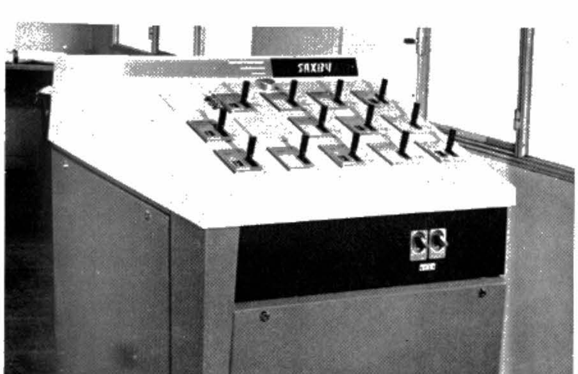


Fig. IX-42 — Poste P.E.L.I. ; vue extérieure (*Saxby-S.N.C.F.*)

Un levier se présente sous forme d'un ensemble monobloc, sensiblement vertical, comportant le levier proprement dit (à trois positions), le verrou électrique et le commutateur. Le câblage, important puisque toutes les commandes sont électriques, aboutit à un connecteur automatique fixé à la partie inférieure du commutateur. Chaque barre de la table d'enclenchements est reliée au levier par une bielle et une équerre de renvoi.

On peut rattacher aux postes électromécaniques les *serrures électriques*, et notamment les serrures de *B.A.L.*, qui ferment automatiquement les signaux d'une petite gare par retrait d'une clé. Cette clé permet de manœuvrer, par serrures à agrafes ou à pène saillant, les aiguilles à main d'accès aux voies de service ou de la communication de secours (liaison permettant de faire passer un train à contre-voie entre deux gares en cas d'incident sur la voie normale). Les serrures de *B.A.L.* sont généralement munies de l'enclenchement d'approche. Elles sont utilisées aussi pour les embranchements simples de pleine voie.

4.3. Les postes électriques à leviers d'itinéraires. Ces postes qui équipaient les grandes gares entre les deux guerres sont en voie de disparition. Ils ont marqué une étape importante de l'évolution des postes par l'apparition de la fonction « itinéraire » qui, dans les installations importantes, diminue considérablement le nombre de leviers à manœuvrer par l'aiguilleur et simplifie les enclenchements.

Quels que soient la forme qu'il prenne et le mouvemnet qu'on puisse lui faire faire (tirer — pousser, tourner, tourner — pousser), chaque levier commande un itinéraire et comporte trois positions (ou cinq par symétrie s'il s'agit d'un itinéraire banalisé, c'est-à-dire qu'on peut utiliser dans les deux sens) :

— une position neutre (médiane) : le signal d'entrée de l'itinéraire est fermé : les aiguilles sont dans une position quelconque ;

— une position dite *cran aiguille :* le signal d'entrée de l'itinéraire est toujours fermé, mais les aiguilles sont disposées pour tracer l'itinéraire ;

— une position dite *cran signal :* le signal d'entrée de l'itinéraire est ouvert.

Les enclenchements sont renfermés dans un meuble appelé *combinateur ;* ils débordent généralement dans un étage intermédiaire du poste (la sous-cabine). Dans le combinateur existent deux séries d'organes :

— Une première série qui matérialise les itinéraires (barres, plongeurs, balanciers, etc.) et commande les signaux par un commutateur associé.

— Une deuxième série qui matérialise les aiguilles (plans, barres, balanciers) et les commande par des commutateurs-rupteurs.

Les taquets — ou autres dispositifs — qui relient les organes de la première série aux organes de la deuxième série réalisent à la fois la commande de l'itinéraire (chaque organe d'aiguille prenant la position correspondant à la

position droite ou gauche de l'aiguille sur le terrain) et les enclenchements entre itinéraires incompatibles (si deux itinéraires sont incompatibles, ils comportent au moins une aiguille qui est à gauche pour l'un, à droite pour l'autre).

Les enclenchements électriques sont réalisés par des verrous qui agissent, soit sur les organes d'itinéraires (par exemple, enclenchement d'approche), soit sur les organes d'aiguilles (enclenchement de zone isolée d'aiguille). L'enclenchement caractéristique de ce type de postes, au moins au début de son évolution, fut l'enclenchement de *transit rigide* qui empêche la destruction d'un itinéraire par remise au cran neutre du levier d'itinéraire tant que cet itinéraire n'est pas entièrement dégagé par le train pour lequel il a été tracé. Par la suite, on remplaça le transit rigide, très gênant pour l'exploitation dans les grands postes, par un transit souple, qui libère chaque portion d'itinéraire dès que le train l'a dégagée, permettant de tracer un itinéraire sécant aussitôt derrière lui. Mais le transit souple ne peut être réalisé aussi simplement que le transit rigide; il doit agir sur les verrous des organes d'aiguilles et nécessite la réalisation de schémas comportant un certain nombre de relais supplémentaires et formant ce qu'on appelle une *grille*. Or, cette grille de transit, alimentant les verrous d'organes d'aiguilles, double partiellement les enclenchements mécaniques. C'est en réfléchissant au moyen d'éviter cette dualité qu'on est arrivé à l'idée du poste *tous relais*.

4.4. Les postes tous relais à transit souple ou P.R.S. — Comme son nom l'indique, c'est en quelque sorte à partir de la grille de transit souple (dont nous venons de parler à propos de postes à leviers d'itinéraires) qu'a été conçu le *P.R.S.* À partir du moment où cette grille dispense de réaliser mécaniquement les enclenchements entre itinéraires incompatibles, il devient inutile également de conserver des organes mécaniques d'aiguilles dont le seul rôle serait de commander des commutateurs et d'être enclenchés par des verrous. Les organes d'aiguilles sont donc des relais basculeurs dits relais *C.Ag*; ces relais sont à positions stabilisées — droite *D* et gauche *G* — afin de se maintenir dans la position commandée après la coupure du courant de commande.

Chaque itinéraire est commandé par un bouton libre, c'est-à-dire sans enclenchement et à une seule position stabilisée, celle de repos. Son action s'enregistre sur un relais de commande d'itinéraire (*C.It*). La commande en position *D* ou *G* de chaque relais *C.Ag* intéressé par l'itinéraire est assurée par le relais *C.It*, si les conditions de sécurité sont remplies.

L'itinéraire est enclenché par la mise en position d'ouverture d'un relais d'enclenchement d'itinéraire (*E.It*), relais basculeur comme les relais *C.Ag*.

L'ensemble des conditions de formation d'un itinéraire (commande de la position des relais *C.Ag*, mise en position d'ouverture du relais *E.It*) est contrôlé sur un relais totalisateur d'itinéraire (*R.It*). Une *grille de contrôle* totalise les contrôles d'aiguilles et de verrous et le relais totalisateur *R.It* sur un relais de contrôle d'itinéraire *K.It* qui provoque l'effacement de l'indication « carré » sur le panneau origine d'itinéraire.

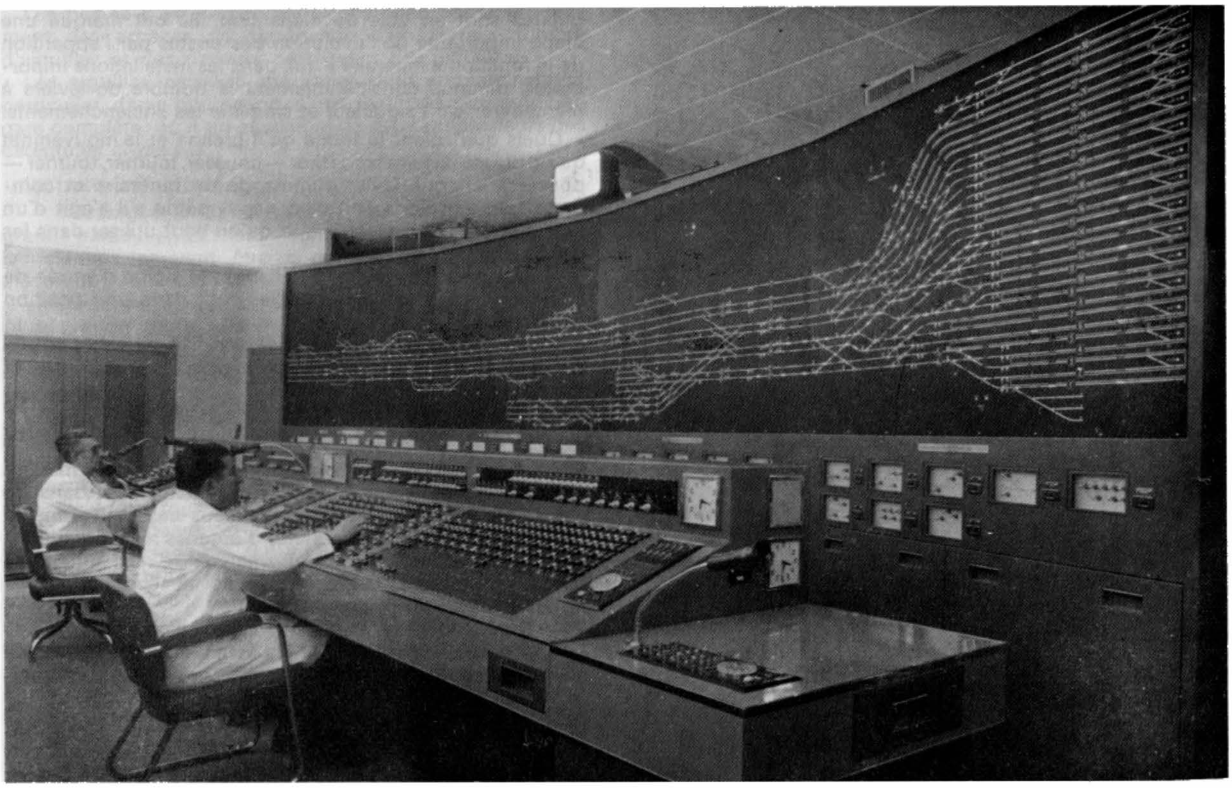
La destruction de l'itinéraire peut être manuelle comme dans les postes à leviers d'itinéraires (ici on *réitère*, c'est-à-dire qu'on appuie une deuxième fois sur le bouton d'itinéraire). Mais en outre, la destruction est automatique dès que le train pour lequel on a tracé l'itinéraire a libéré la première zone de transit. Certains itinéraires ont un deuxième bouton de commande — le bouton de *tracé permanent* — qui supprime l'action de la destruction automatique, pour une série de trains qui empruntent le même itinéraire.

Une autre particularité du *P.R.S.* est l'enregistrement. Si un itinéraire est tracé et qu'on veuille commander un itinéraire incompabible, ce dernier ne se forme pas mais sa commande est enregistrée, c'est-à-dire que le deuxième itinéraire se forme automatiquement, sans nouvelle action, dès que le transit correspondant à la partie incompatible du premier itinéraire est libérée. On peut même :

— commander un itinéraire en destruction automatique;
— enregistrer un itinéraire incompatible;
— *surenregistrer* le premier itinéraire en tracé permanent.

Les *boutons* sont groupés sur un pupitre devant l'aiguilleur. Lorsqu'on veut commander un itinéraire, on appuie sur le bouton correspondant; le voyant de table situé au-dessus du bouton clignote. Lorsque l'itinéraire est formé (relais *R.It* excité) le voyant passe du clignotant au fixe. En même temps, le tracé de l'itinéraire s'allume en blanc au *tableau de contrôle optique* (T.C.O.) (fig. IX-43) qui dessine pour l'aiguilleur le tracé des voies de la zone du poste et

Fig. IX-43 — Poste tous relais à transit souple; cabine (*S.N.C.F.*)



regroupe les différents contrôles (signaux, circuits de voie, aiguilles, autorisations de manœuvres, etc.). Si un itinéraire incompatible a déjà été formé, le voyant de bouton de l'itinéraire commandé reste au clignotant (itinéraire enregistré) jusqu'à réalisation des conditions voulues.

Nous avons vu que la destruction manuelle est commandée par une nouvelle action sur le bouton. Si la zone d'approche de l'itinéraire est occupée, la destruction est retardée de quelques minutes par un temporisateur (pour éviter de modifier l'itinéraire avant que le train n'ait eu le temps de freiner) ; la fermeture du carré peut toujours être obtenue instantanément par actionnement d'un commutateur spécial.

Si on laisse agir la destruction automatique, chacune des zones de l'itinéraire s'allume en rouge dès qu'elle est abordée par le train et s'éteint derrière lui. Le voyant de bouton s'éteint dès la destruction de l'itinéraire (c'est-à-dire dès libération de la première zone).

Les autorisations de manœuvre sont commandées par des boutons identiques à ceux des itinéraires. Elles libèrent la clé d'une serrure électrique, clé dont le retrait permet la commande d'aiguilles à pied d'œuvre.

L'ensemble des *fonctions logiques* du poste, sommairement définies ci-dessus, est généralement réalisé au moyen de relais de poste électromagnétiques (en principe du type *N.S1*). Mais on utilise aussi :

— des relais statiques du type décrit au paragraphe 2.6 ;

— des systèmes à tores de ferrite, matériau magnétique à cycle d'hystérésis quasi rectangulaire pouvant occuper de façon stable deux états différents (poste électronique à ferrite système Thomson).

Les postes *P.R.S.* peuvent être de dimensions très variables de quelques itinéraires à 644 itinéraires (poste de Paris-Est). Leur conception facilite très largement le travail de l'aiguilleur. Celui-ci peut être davantage encore facilité par un *programmateur* qui trace automatiquement différents itinéraires mis en mémoire au fur et à mesure de la libération de l'itinéraire précédent. Ces programmateurs ont l'avantage de permettre toute modification au programme tant que l'itinéraire n'est pas commandé (fig. IX-44).

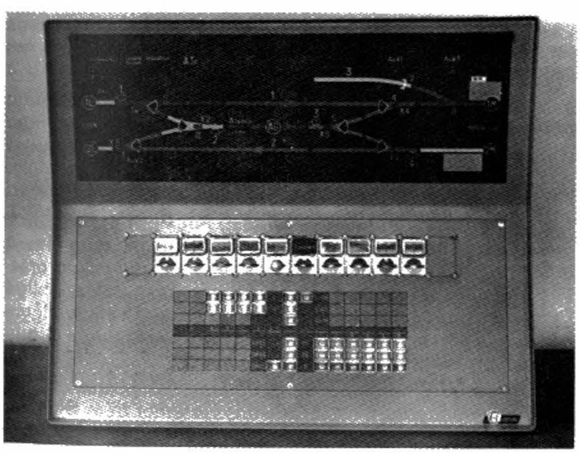


Fig. IX-44 — Programmateur de La Roche-de-Glun (*S.N.C.F.*)

4.5. Les postes tous relais géographiques simplifiés ou P.R.G.S. — Ces postes sont dits *simplifiés* du fait qu'ils ne réalisent pas l'enregistrement. Par ailleurs, ils sont *géographiques* à un double point de vue.

D'une part, leurs boutons, au lieu d'être groupés sur un clavier, sont installés directement sur le tableau de contrôle optique qui est généralement disposé horizontalement. Il y a un bouton par origine d'itinéraire et un bouton par destination. Il faut actionner deux boutons pour commander un itinéraire, d'abord le bouton de destination (ou de sortie), puis le bouton d'origine (ou d'entrée).

D'autre part, *le câblage* du poste est lui aussi *géographique*. Dans le *P.R.S* normal existent aussi des parties de câblage géographiques, c'est-à-dire dont les liaisons entre organes (relais) dessinent le schéma des itinéraires. C'est le cas de la *grille* de transit et de la *grille* de contrôle. Mais les différentes grilles sont relatives chacune à une fonction logique et non géographique et les différents stades de la commande d'un itinéraire cheminent suivant des circuits qui n'ont rien de commun avec le plan des voies. Dans un poste à câblage géographique, tel le *P.R.G.S.*, chacune des fonctions logiques relative à une aiguille, à un signal, à une voie à quai, à une origine ou à une destination d'itinéraire est regroupée dans un *bloc*.

De cette façon, le câblage de deux blocs de même dénomination (deux blocs d'aiguille, par exemple) est identique et le câblage entre blocs dessine à peu près le même schéma que les voies sur le terrain. L'avantage essentiel est qu'en cas de modification du plan de voies, la modification du poste se borne, du moins pour sa plus grande part, à la suppression ou à l'addition de blocs, ainsi qu'à la modification du câblage à l'extérieur des blocs.

Les *P.R.G.S* sont sensiblement plus économiques que les *P.R.S.* normaux.

4.6. Les postes à commandes individuelles. — Dans certains cas :

— parties de gares où ne circulent pas de trains de voyageurs,

— postes provisoires,

— postes à programme d'exploitation particulièrement simple, les postes à itinéraires ne conviennent pas. On réalise maintenant des postes entièrement électriques qui commandent individuellement aiguilles et signaux. Ce sont des postes analogues au *P.E.L.I.* mais dans lesquels les organes de commande (boutons, manettes à deux positions, manettes tournez — poussez) sont sans enclenchement électromécanique. Le principe du schéma n'est pas essentiellement différent de celui du *P.R.S.* mais il est sensiblement plus simple.

On distingue deux types : le *P.C.I.* (Poste à commandes individuelles) et le *P.R.M.I.* (Poste tous relais à manettes individuelles). Dans un cas comme dans l'autre, les manettes sont montées sur le tableau de contrôle.

4.7. Les télécommandes. — Les postes électriques modernes ont un rayon d'action évidemment beaucoup plus important que les anciens postes mécaniques. Toutefois, au-delà d'une certaine distance (3 à 4 km) les frais de câblerie deviennent très importants. On a alors recours à la *télécommande* de postes dits *satellites*. Du point de vue de l'aiguilleur, rien ne distingue (au moins en service normal) la zone du poste commandée directement des zones télécommandées. Du point de vue technologique, chacune des zones télécommandées est rattachée à un poste satellite situé au centre de la zone et qui comporte toutes les fonctions logiques, et tous les dispositifs d'alimentation et de commande d'un poste normal. Mais les relais *C.It*, au lieu d'être commandés directement par les boutons, sont commandés par un ensemble *récepteur de télécommande*. En outre, les relais de contrôle, au lieu d'actionner directement les voyants du tableau de contrôle optique, agissent sur un ensemble *émetteur de télécontrôle*.

Le poste central comporte de même des *émetteurs de télécommande* et des *récepteurs de télécontrôle*. Émetteurs et récepteurs sont reliés par des lignes à un petit nombre de fils (deux à quatre).

Les systèmes de télécommande-télécontrôle sont nombreux. Tout système peut, en principe, s'adapter à la télécommande des postes puisque celle-ci n'est pas de sécurité intrinsèque.

Toutefois, le système de télécontrôle doit satisfaire à certaines conditions de sécurité car, en cas de dérangement de la commande d'un signal, l'aiguilleur peut donner un ordre de franchissement de signal sur le vu des contrôles de position d'aiguille.

Du point de vue technologique, la télécommande comprend :

— la formation d'un code ;

— le support du code ;

— la transmission du code.

Dans les systèmes modernes, le support du code est généralement une fréquence et la transmission fait appel à

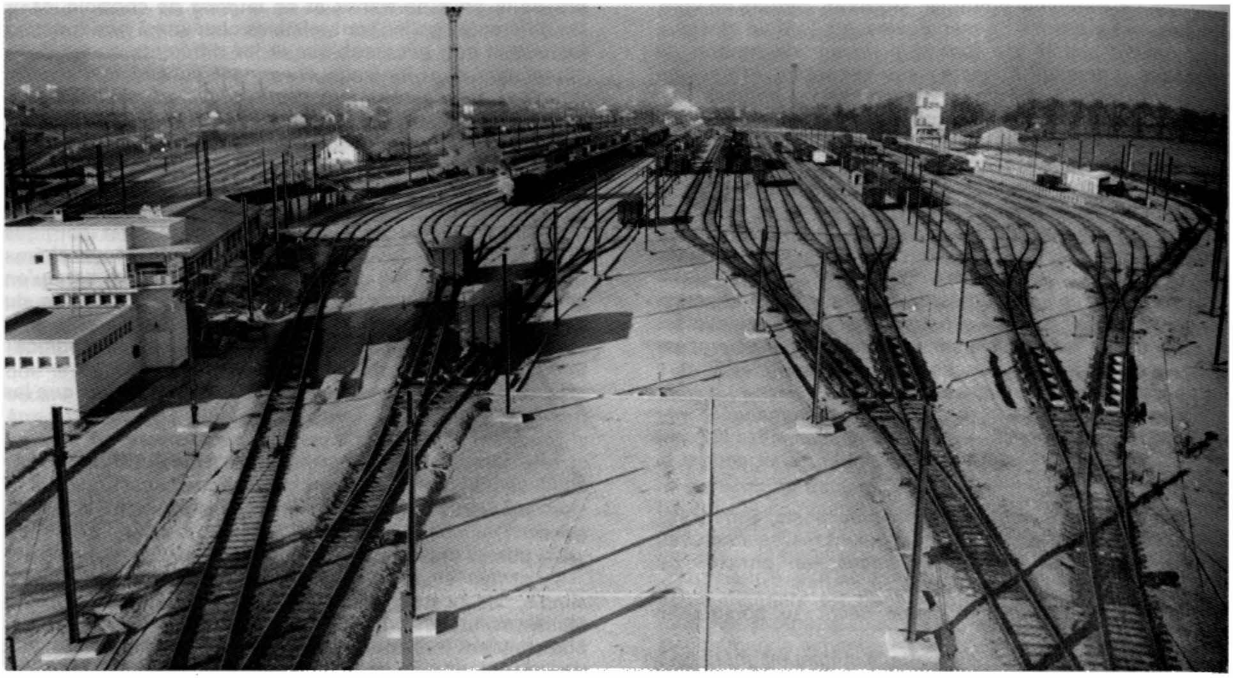


Fig. IX-45 — Vue d'une tête de faisceau de triage (*La Photo artistique - S.N.C.F.*)

des techniques électroniques. Dans les cas simples, le code peut être à petit nombre d'impulsions de deux fréquences parmi quatre, par exemple. Dans les cas plus complexes, on fait appel à des impulsions en nombre plus important et à glissement de fréquence (en plus ou en moins). La génération des codes se fait encore souvent en technique électromagnétique mais dans les systèmes les plus modernes elle est faite, comme la transmission, en technique électronique (avec maintien de relais frontières électromagnétiques). Chaque code comporte une adresse et un message proprement dit.

Le télécontrôle n'est pas identique à la télécommande pour deux raisons :

— Une commande n'est à transmettre qu'au moment où l'aiguilleur actionne un bouton; au contraire, pour les raisons de sécurité signalées, on ne peut se contenter de transmettre un contrôle uniquement quand un organe change de position.

— Le nombre de contrôles à transmettre est nettement plus important que le nombre de commandes.

Pour résoudre ces deux problèmes, les systèmes de télécontrôle peuvent présenter, par exemple, les caractéristiques suivantes :

— Balayage cyclique, avec synchronisation aux deux extrémités par un circuit spécial.
— Nombre de fils de ligne, ou nombre de fréquences différentes, plus grand pour le télécontrôle que pour la télécommande.

Lorsqu'au lieu de commander les zones éloignées d'une gare importante, on veut commander de petites gares échelonnées le long d'une ligne, on réalise ce qu'on appelle une *commande centralisée de circulation* (*C.C.C.*).

Dans ce cas, l'aiguilleur est généralement un opérateur de *poste de régulation* (ou poste de commandement). La *C.C.C.* est essentiellement développée pour les voies uniques (V. ci-après).

4.8. Les postes automatiques de triage. — Bien que ces postes ne soient pas des installations de sécurité à proprement parler, nous en dirons quelques mots.

Le problème du triage des trains de marchandises consiste à placer les wagons d'un train (wagons dont les destinations sont généralement très variées) sur différentes voies affectées chacune à une seule destination. Lorsqu'une de ces voies est pleine avec les wagons qu'elle contient, on forme un train pour la destination correspondante. Les principales gares de triage comportent de 30 à 50 voies (fig. IX-45).

Le procédé de triage le plus économique et le plus rapide consiste à pousser le train à trier sur une voie terminée par une *butte*, après avoir défait les attelages. Dès qu'un wagon a franchi le sommet de la butte, il se détache du reste du train et descend par gravité vers une des voies de triage, selon la direction imposée aux aiguillages qui leur donnent accès.

La particularité du poste de triage, qui commande ces aiguillages, est de ne disposer d'aucun signal, ni d'aucun moyen d'arrêter les wagons à partir du moment où ils ont franchi la butte. Les problèmes à résoudre sont :

— d'une part, de manœuvrer les aiguilles assez vite pour qu'un wagon ne risque pas de les trouver entrebâillées. Pour cela, il existe des mécanismes de manœuvre électriques spéciaux : dans un premier temps, le moteur de manœuvre comprime un ressort et dans un deuxième temps ce ressort se détend brusquement en entraînant l'aiguille;

— d'autre part, de manœuvrer les aiguilles au moment opportun, même lorsque deux wagons se suivent de près. S'ils se suivent de trop près, on est néanmoins obligé d'accepter que le deuxième wagon soit dirigé vers la même voie que le précédent; on dit alors qu'il y a *rattrapage* et que le deuxième wagon est *dévoyé*.

Pour résoudre ce deuxième problème, les postes utilisés sont des *simulateurs*, c'est-à-dire des systèmes dans lesquels chaque wagon est simulé ou représenté par un élément qui progresse en même temps que lui et qui actionne au fur et à mesure de sa progression les organes de commande des aiguilles. Cette action n'est toutefois possible que lorsque le wagon précédent a libéré la zone d'aiguille, sinon, on est dans le cas de wagon dévoyé; le deuxième wagon est alors représenté par le même élément que le premier et le deuxième élément est éliminé.

On a réalisé de tels simulateurs, sous forme électromécanique, aux environs de 1930 : ce sont les *combinateurs à billes Robert Levi*; l'élément qui simule le wagon est une bille qui descend dans un tube, à raison d'un tube par voie de destination. La bille est arrêtée à différents étages par un *basculeur* qui s'efface lorsque le wagon attaque la zone qui précède chaque aiguille, à condition que la zone d'aiguille elle-même soit libre.

À ce moment la bille descend d'un étage en actionnant un *contacteur* qui commande le moteur d'aiguille dans la

bonne position. S'il y a rattrapage, la bille est éjectée du tube.

L'aiguilleur est placé au voisinage de la butte pour lire l'étiquette de destination de chaque wagon. Il actionne le bouton correspondant sur un clavier, bouton qui libère une bille en haut du tube voulu.

Dans les postes modernes, l'élément simulateur est une *impulsion électrique* circulant dans les circuits d'un *simulateur électronique* en agissant sur des *portes* qui commandent les aiguilles par l'intermédiaire d'amplificateurs et de relais-frontières. Une chaîne de comptage signale à l'aiguilleur le nombre de dévoyés par voie.

Ce simulateur peut être un *système électronique câblé,* spécialement agencé pour cette fonction. On peut aussi utiliser un *calculateur* du commerce, dont seul le programme est particulier. L'avantage de ce système est que le calculateur peut être utilisé à d'autres fins, notamment à la commande automatique des *freins de voie.* Ce sont de puissantes installations (à commande hydraulique ou pneumatique) qui serrent les roues des wagons dans leurs tenailles pour les ralentir dans leur descente de la butte et dans leur mouvement sur les voies de classement, pour éviter les chocs avec les wagons déjà en place.

5. LA SÉCURITÉ SUR VOIE UNIQUE

Les systèmes de sécurité sur voie unique cumulent en général trois fonctions :

— La fonction *croisement* qui consiste à disposer des aiguilles de façon convenable pour permettre le croisement de deux trains.

— La fonction *cantonnement* qui est identique à celle étudiée au paragraphe 3 pour la double voie.

— La fonction *nez à nez* qui vise à empêcher la rencontre de deux trains de sens contraire sur la voie unique. Les installations correspondantes sont généralement inséparables des installations de cantonnement ; nous classerons donc les différents systèmes de voie unique d'après leur régime de cantonnement.

5.1. La voie unique à cantonnement téléphonique. Il existe de nombreux systèmes de voie unique de ce type. En effet, il s'applique à des voies peu ou très peu chargées ; on n'a donc généralement pas eu de raison de modifier profondément des installations existantes qui peuvent remonter à une époque assez éloignée.

On distingue :

— les gares de *voie de gauche,* dans lesquelles chaque train circule sur la voie située à sa gauche comme en double voie. Chaque train prend au moins une aiguille en déviation et subit donc un ralentissement, même s'il ne s'arrête pas dans la gare ;

— les gares de *voie directe,* dans lesquelles le train, s'il n'y a pas croisement, ou un des deux trains s'il y a croisement, circule sans prendre d'aiguille en déviation, donc sans ralentir (à condition que les aiguilles soient verrouillées).

À un autre point de vue, on distingue :

— les gares à *signalisation simplifiée,* dont la seule signalisation est une pancarte *arrêt* à distance et une pancarte portant un chevron en pointe de chaque aiguille et dont les aiguilles sont manœuvrées à main, sans enclenchement ;

— les gares de *voie directe type S.N.C.F.* représentées sur la figure IX-46, qui comportent une signalisation complète, mécanique ou électrique (dans ce dernier cas, le sémaphore reste mécanique). Les aiguilles sont manœuvrées sur place à la main, les verrous étant manœuvrés à distance de la gare par transmission funiculaire. Verrous, aiguilles et signaux sont enclenchés par serrures, avec serrure centrale ;

— les autres gares, dont la signalisation et les enclenchements présentent des dispositions intermédiaires entre les deux cas extrêmes ci-dessus.

Dans tous les cas, le cantonnement est assuré téléphoniquement. Les croisements sont réalisés conformément aux indications des documents horaires qui sont sur ces lignes des documents de sécurité. Le sémaphore, quand il y en a un, sert à la fois au cantonnement et à retenir les trains en cas de croisement.

En cas de retard d'un train, on peut procéder à un changement de croisement grâce à un échange de dépêches entre deux gares. Ces dépêches sont échangées par téléphone, transcrites intégralement sur un registre spécial et doublement numérotées (un numéro pour chacune des deux gares).

5.2. Le block manuel de voie unique. — Dans le cas où l'on installe le block manuel de voie unique, le trafic justifie en général que les gares de croisement soient des gares de voie directe, du type décrit ci-dessus.

Quant au block, il présente des dispositions générales analogues à celles du block manuel de double voie mais on ajoute une disposition particulière, le *test.* Ce test est une impulsion, codée ou vibrée suivant les cas, envoyée manuellement à une des gares encadrantes. Celle-ci envoie automatiquement en retour la *réponse au test,* à condition qu'un certain nombre de conditions soient remplies :

— sémaphore pour la direction correspondante, fermé et verrouillé ;

— avertissement présenté ;

— voie libre reçue derrière le dernier train de sens inverse ;

— une opération de test éventuelle lancée par la gare interrogée vers la gare interrogatrice n'ayant pas déjà reçu de réponse positive.

S'il en est bien ainsi, le sémaphore de sortie est déverrouillé par la réponse de test et peut être ouvert (il est normalement en position de fermeture).

5.3. Le B.A.P.R. de voie unique — C.C.V.D. et C.C.V.G. — La transposition pure et simple du *B.A.P.R.* à la voie unique n'offre aucun intérêt, puisqu'il faut de toute façon conserver un agent de sécurité dans chaque gare d'une part, pour faire le test dans la direction voulue, d'autre part, pour faire les opérations de croisement.

On est donc conduit à associer le *B.A.P.R.* avec une *commande centralisée,* entre les mains soit du régulateur du poste de commandement, soit d'une gare de la ligne (généralement à l'une de ses extrémités ; fig. IX-47). Cet agent dispose d'une manette de sens pour chaque intervalle entre gares.

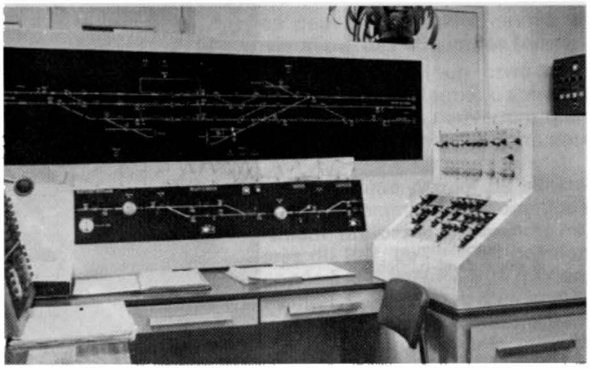


Fig. IX-47

Table de commande C.C.V.G. (*S.N.C.F.*)

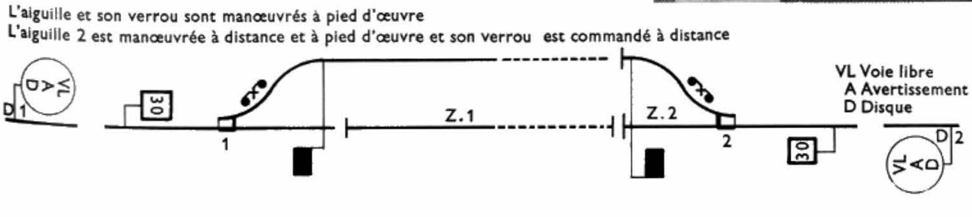
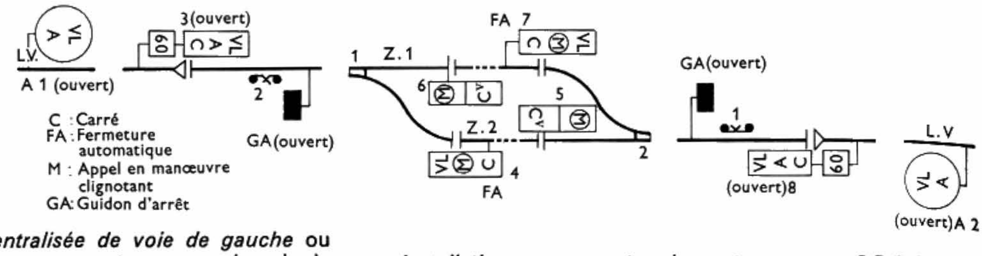


Fig. IX-46

Fig. IX-48



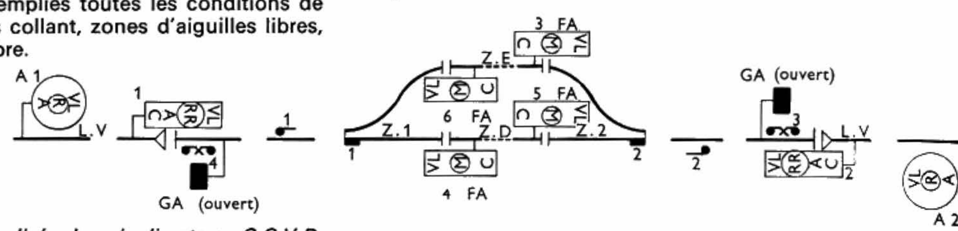
Dans la *commande centralisée de voie de gauche* ou *C.C.V.G.* (fig. IX-48), chaque gare est une gare de voie de gauche. Les trains qui quittent une gare talonnent l'aiguille de sortie, toujours disposée à gauche; il n'y a donc pas d'aiguille à manœuvrer à distance mais seulement deux verrous.

La manette de sens à disposition de l'agent de la commande centralisée provoque par télécommande les actions suivantes:

— déverrouillage de l'aiguille de sortie;
— ouverture du signal de sortie;
— ouverture du signal d'entrée;

sous réserve que soient remplies toutes les conditions de sécurité voulues: aiguilles collant, zones d'aiguilles libres, ligne de voie (V. § 3.3.) libre.

Fig. IX-49



Dans la *commande centralisée de voie directe ou C.C.V.D.* (figure IX-49), un certain nombre de gares (sinon toutes) sont des gares de voie directe. Les aiguilles et les signaux de ces gares sont manœuvrés par un petit *P.R.S.* télécommandé du poste de commande centralisé.

5.4. Le block automatique de voie unique. — Le block automatique traditionnel est très peu utilisé pour les voies uniques proprement dites. Il est davantage utilisé sous forme de block de *voie banalisée*, ce qui est le cas de certaines portions à double voie de lignes à très fort trafic (Paris — Dijon, par exemple).

Dans ce système, chacune des deux voies peut être utilisée indifféremment dans un sens ou dans l'autre. Toutes les gares sont équipées en principe de *P.R.S.* télécommandés et la formation d'un itinéraire de sortie détermine le sens (avec intervention d'un relais basculeur).

Sur les lignes à double voie à trafic important, mais ne justifiant pas la banalisation, on utilise le système des *installations permanentes de contre-sens* ou *I.P.C.S.* pour circuler à contre-voie en cas d'incident ou de travaux sur l'autre voie. Dans le sens normal, les circulations sont cantonnées par le block automatique. En contre-sens, les circulations sont cantonnées seulement de gare à gare, grâce à un *enclenchement de sens* établi par la gare origine du mouvement, avec contrôle de la libération des circuits de voie intéressés. Les aiguilles donnant accès à la voie en contre-sens sont manœuvrées de préférence par des moteurs électriques commandés, soit par un élément de *P.R.S.*, soit par des verrous-commutateurs enclenchés par clés.

6. LES PASSAGES À NIVEAU À SIGNALISATION AUTOMATIQUE

Les installations de passages à niveau (P.N.) automatiques (fig. IX-50) comprennent deux parties:

— une partie routière;
— un mécanisme de commande automatique par les trains.

6.1. Signalisation routière des passages à niveau automatiques. — Cette signalisation comprend, dans tous les cas, deux feux rouges clignotants situés de part et d'autre de la chaussée. Pour les automobilistes ces feux clignotants ont la même signification d'arrêt absolu que les feux rouges fixes.

Ils sont constitués par des unités lumineuses du genre de celles des panneaux de signalisation lumineuse ferroviaire.

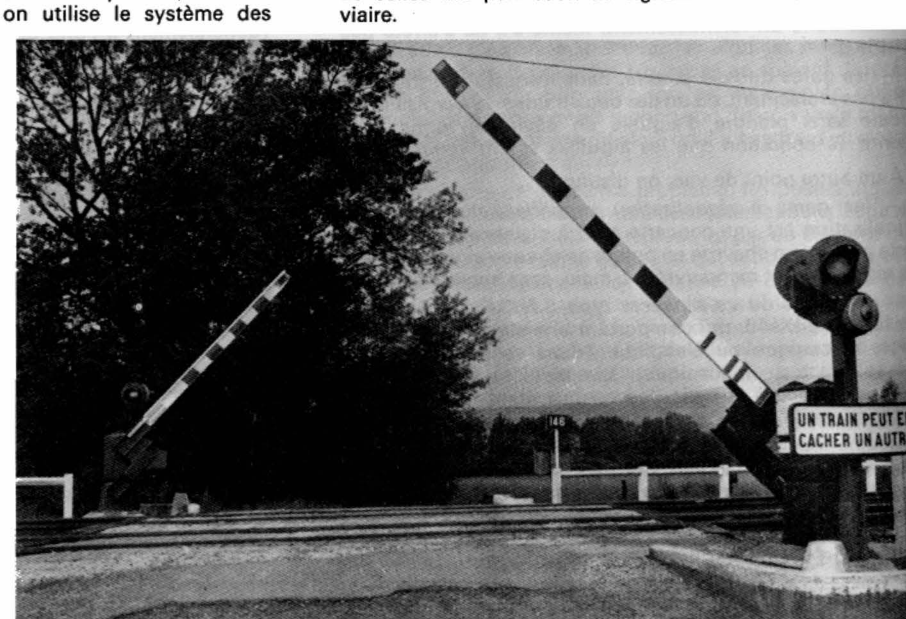


Fig. IX-50

Passage à niveau automatique à deux demi-barrières (*S.N.C.F.*)

Cette signalisation peut être complétée, en fonction de l'importance de la circulation routière et de la circulation ferroviaire, suivant des règles fixées par arrêté ministériel, soit par deux demi-barrières barrant la moitié de la chaussée en quinconce, soit par quatre demi-barrières barrant la totalité de la chaussée, ou par deux demi-barrières et un *séparateur de sens*.

Les demi-barrières sont équilibrées à la fermeture, de façon à se fermer en cas de panne de courant (on retrouve ici une fois de plus le principe de sécurité intrinsèque), sauf les demi-barrières de sortie des systèmes à quatre demi-barrières qui sont équilibrées à l'ouverture pour éviter d'*encager* un véhicule routier passant juste au moment où la barrière d'entrée se ferme.

Les demi-barrières sont commandées à l'ouverture (ou à la fermeture dans le cas de barrières de sortie), soit par un moteur électrique, soit par un vérin hydraulique. L'ensemble du mécanisme, comprenant outre le moteur et le train d'engrenages réducteurs (ou le vérin), un commutateur avec contacts de fin de course, un relais rupteur et un relais désengageur (pour commander le retrait du cliquet de retenue) est contenu dans un carter monté sur un socle (fig. IX-51). Les *lices* elles-mêmes sont en résine synthétique stratifiée colorée en bandes rouges et blanches.

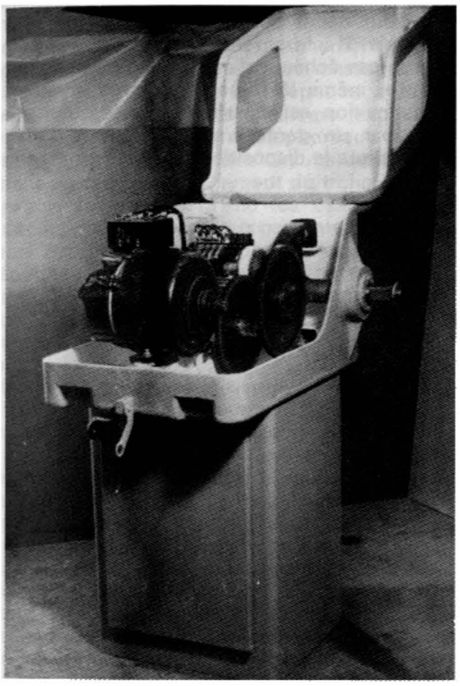


Fig. IX-51 — Mécanisme de manœuvre de passage à niveau (*Alsthom-S.N.C.F.*)

Enfin, la signalisation routière peut être complétée par une sonnerie.

Le cycle de fonctionnement est le suivant :

— 25 à 30 s environ avant l'arrivée du train au passage à niveau, les feux clignotants sont présentés ;

— 5 s après le début du fonctionnement des feux, les demi-barrières commencent à se fermer et la sonnerie se déclenche ;

— lorsque les barrières sont fermées, la sonnerie cesse de tinter mais les feux rouges continuent à clignoter ; si le passage à niveau est muni de quatre demi-barrières, les barrières de sortie commencent à se fermer ;

— aussitôt que le train a dégagé le passage à niveau, les feux s'éteignent, et les demi-barrières commencent à se relever.

6.2. Commande de la signalisation routière par les trains. Cas de la pleine voie. — Le système comporte les éléments suivants :

— deux pédales d'annonce orientées (en série, une sur chaque file de rail). Elles sont situées à une distance du passage à niveau (P.N.) égale à celle parcourue par le train le plus rapide de la ligne en 25 ou 30 s ;

— une pédale de réarmement à proximité immédiate du P.N. ;

— deux autres pédales orientées pour l'annonce des trains circulant à contre-sens (ou dans l'autre sens sur voie unique) ;

— un circuit de voie court à la traversée du P.N. (et débordant de part et d'autre) ;

— une guérite de signalisation groupant des relais nécessaires au fonctionnement du système, l'appareillage du circuit de voie court et l'alimentation en courant de tout le système, y compris les signaux routiers.

Le principe du fonctionnement est le suivant :

— au passage du train sur les pédales d'annonce, le relais d'annonce est désexcité et il reste ainsi jusqu'à la fin de la séquence ;

— la désexcitation du relais d'annonce déclenche la séquence des signaux routiers, telle qu'elle est décrite au paragraphe 6.1 ;

— l'attaque de la pédale de réarmement provoque, si le circuit de voie court est libéré, la réexcitation du relais d'annonce et, par son intermédiaire, l'arrêt des feux et la remontée de la barrière ;

— l'attaque des pédales d'annonce de contre-sens est sans action dans le sens normal (et vice versa).

L'intérêt du circuit de voie court est d'empêcher la remontée des barrières tant que la totalité du train n'a pas dégagé le passage à niveau.

Sur les lignes équipées en block automatique classique (*B.A.L.*), du fait de la permissivité totale, un train (en marche à vue) peut attaquer les pédales d'annonce alors que le train précédent n'a pas encore dégagé le passage à niveau ; si aucune précaution n'était prise, le deuxième train aborderait le P.N. barrières ouvertes. Pour remédier à cet inconvénient, un relais répétiteur des circuits de voie compris entre les pédales d'annonce et le P.N. coupe l'alimentation du relais d'annonce qui ne peut donc se réexciter que si la voie entre les pédales d'annonce et le P.N. est libre. Dans le cas de circuits de voie électroniques, on évite de les rescinder en utilisant les prises d'information intermédiaires.

Sur les lignes équipées de *B.A.L.* ou de *B.A.P.R.*, le circuit de voie court est toujours électronique et sans joint isolant.

6.3. Commande de la signalisation routière par les trains. Cas des P.N. à proximité des gares. — Le système de base reste le même mais un certain nombre de conditions viennent compliquer la séquence décrite ci-dessus.

Donnons quelques exemples :

— les circuits d'annonce peuvent être sélectionnés en fonction des signaux ouverts ou des itinéraires formés ;

— une annonce peut être *réservée*, si un carré situé entre les pédales d'annonce et le P.N. est fermé. L'annonce se déclenche si le carré est commandé à l'ouverture mais l'ouverture effective est différée pour donner à l'annonce une durée suffisante ;

— un dispositif *manuel-automatique* permet de substituer la commande manuelle à la commande automatique dans les cas de stationnement prolongé, de manœuvre, de départ d'un train trop près du P.N. La mise en position *manuelle* peut être subordonnée à la fermeture d'un guidon, d'un disque ou d'une autorisation de manœuvre d'un poste ;

— un dispositif *annonce normale-annonce réduite* peut modifier la longueur de l'annonce prise en compte, suivant des modalités voisines du cas ci-dessus ;

— un dispositif entièrement automatique peut annuler l'annonce tant que le train manœuvre sous la protection de certains signaux, etc.

Dans certains cas, l'ensemble de ces dispositions conduit à une *logique* d'annonce complexe, parfois plus complexe qu'un itinéraire *P.R.S.* Bien entendu, cette logique doit toujours satisfaire aux critères de sécurité

intrinsèque ; on emploie par conséquent le même matériel que pour les autres installations de sécurité.

6.4. Commande de la signalisation routière par les trains. Cas spéciaux. — Sur les lignes à grande vitesse (en principe supérieure à 160 km/h) ou sur les lignes à vitesse moyenne, aux P.N. où la circulation routière est très importante, on prend certaines dispositions complémentaires :

— *Dispositif de régularisation de temps d'annonce* pour éviter un trop long délai de fermeture des barrières pour les trains lents.

Ce dispositif comporte trois pédales successives : une pédale de préparation, une pédale trains rapides, une pédale trains lents. Suivant le temps mis par le train pour parcourir la distance pédale de préparation-pédale trains rapides, c'est cette dernière pédale qui est active — ou la pédale trains lents.

— *Dispositif détecteur d'obstacles :*

Ce dispositif utilisant des radars est chargé de détecter, soit la présence d'un véhicule routier sur la voie au moment de la fermeture des barrières, soit l'enfoncement des barrières après leur fermeture.

Ce dispositif déclenche, le cas échéant, l'allumage électrique de *torches à flamme rouge*, qui prescrivent aux mécaniciens un arrêt d'urgence dès qu'ils l'aperçoivent. Notons à ce sujet que les torches à flamme rouge à allumage à main sont couramment utilisées par le personnel des chemins de fer pour arrêter inopinément un train chaque fois que les circonstances l'obligent. Ces torches sont vues à assez grande distance, même de jour.

7. LES PASSAGES À NIVEAU À GARDIENNAGE MANUEL

Lorsque les dispositions esquissées ci-dessus (§ 6.3) seraient trop complexes — ou lorsque des circonstances locales l'imposent — le gardiennage manuel du passage à niveau est maintenu.

Dans ce cas, le garde dispose d'annonces des trains analogues au système de commande des signaux automatiques lumineux décrit aux paragraphes 6.2 et 6.3. Ces annonces, au lieu de commander directement des mécanismes de barrière provoquent :

— la présentation d'un voyant (un par sens et par direction) ;

— le tintement d'une ou de deux sonneries.

La durée de ces annonces est toutefois plus longue (voisine de 1 mn) que celle des annonces des signaux automatiques lumineux. En outre, pour les P.N. à proximité des gares, le programme peut être moins complet, le garde disposant, en revanche, d'une liaison par téléphone, ou par tout autre dispositif, avec le poste d'aiguillages ou avec le chef de sécurité de la gare.

Le garde peut manœuvrer à main des barrières (barrant la chaussée en totalité) de type entièrement mécanique, mais on recourt souvent à des mécanismes électriques, du genre de celui décrit au paragraphe 6.1 ou d'un type analogue, mais avec barrière en équilibre indifférent, ce qui permet le cas échéant d'arrêter la barrière en cours de manœuvre (et même de repartir en sens inverse). Cette dernière disposition est possible du fait qu'une barrière manœuvrée par un garde n'est pas une installation de sécurité (alors que le dispositif d'annonce en est une).

CHAPITRE X

TÉLÉCOMMUNICATIONS

Dès son apparition vers 1840, le chemin de fer a utilisé le télégraphe morse pour passer des messages de service entre les gares. Vers 1880 le téléphone a remplacé le télégraphe et a permis une meilleure exploitation des lignes grâce au cantonnement téléphonique. Au début du siècle apparaissent les premiers circuits de régulation qui permettent un meilleur écoulement du trafic.

Jusqu'aux environs de 1920 les usagers d'un centre important étaient reliés entre eux par l'intermédiaire de commutateurs manuels desservis par des opératrices. C'est à cette époque que sont apparus les commutateurs automatiques. Le raccordement interurbain de ces autocommutateurs s'est d'abord effectué par l'intermédiaire d'opératrices, puis vers 1950 de façon entièrement automatique.

Quelques années avant la dernière guerre mondiale, les électrifications ont été accompagnées de la mise en câbles des circuits téléphoniques. Par la suite on a installé sur ces câbles des systèmes à courants porteurs qui permettent, sur une seule paire, de transmettre plusieurs communications (douze, soixante ou trois cents) ; l'apparition des câbles coaxiaux a permis d'étendre les systèmes à courants porteurs jusqu'à deux mille sept cents voies.

La radio a été utilisée après la guerre pour les liaisons des triages et tout récemment pour les liaisons entre régulateur et trains en marche.

Par ailleurs, la télégraphie par téléimprimeurs et les transmissions de données ont trouvé des applications pour la gestion des wagons. Dans le futur, le réseau de transmission de données permettra de traiter d'autres problèmes tels que la gestion centralisée du trafic des marchandises, la location des places, etc. En téléphonie automatique, l'introduction de la commutation électronique, caractérisée par l'utilisation d'ordinateurs, permettra, en particulier, de réduire l'encombrement du matériel actuel et de faciliter la maintenance et l'entretien.

Après avoir expliqué comment ont été résolus les problèmes posés par la présence des lignes aériennes ou souterraines de télécommunications à proximité des caténaires, nous examinerons les différentes techniques appliquées au chemin de fer : téléphonie automatique, téléphonie sélective, télégraphie, transmission de données, radio et chronométrie.

1. LES CIRCUITS DE TRANSMISSION

Les premiers circuits utilisés par le chemin de fer, comme d'ailleurs par les P.T.T., étaient groupés en lignes aériennes. Sur les artères ferroviaires à trafic important où le nombre de circuits augmentait d'année en année, on arrivait à la saturation car les artères aériennes ne pouvaient recevoir, dans le meilleur des cas, que 80 fils (soit 40 circuits 2 fils).

Avec des transformateurs, on réalisa un montage appelé « combinaison » qui permit d'augmenter le rendement d'une nappe aérienne en constituant à partir de deux circuits métalliques un troisième circuit appelé fantôme (fig. X-1).

Les transformateurs utilisés, appelés translateurs, étaient conçus spécialement pour la téléphonie. Le circuit fantôme utilisait à l'aller les deux conducteurs en parallèle de l'un des circuits et au retour les deux conducteurs en parallèle de l'autre circuit. Les demi-enroulements des translateurs étant symétriques, les courants circulant sur le fantôme ne perturbaient pas les conversations sur les circuits réels.

Malgré cet artifice, le nombre de circuits utilisables sur une artère aérienne restait insuffisant. L'électrification des lignes, d'abord en 1 500 V continu, puis en 25 kV alternatif, entraîna la mise en câble des circuits, ce qui résolut le problème posé par la saturation des artères.

1.1. Protection des circuits le long des voies

1.1.1. Lignes électrifiées en 1 500 V continu. — Dans le cas d'électrification sous tension continue 1 500 V (aujourd'hui pratiquement abandonnée), la mise en câble n'est pas obligatoire. À la sortie des sous-stations il suffit de filtrer l'harmonique 6 (300 Hz), résidu du redressement du courant à 50 Hz, pour obtenir des circuits téléphoniques de bonne qualité. Sur l'artère Paris-Bordeaux, par exemple, où le nombre de circuits n'était pas très grand, la ligne aérienne a été conservée malgré l'électrification. En revanche, sur Paris-Lyon où le nombre de circuits devenait trop grand, la mise en câble a été jugée indispensable.

Des précautions sont à prendre pour éviter la détérioration de l'enveloppe du câble par le retour des courants de traction vers la sous-station. En effet, le courant continu de traction est fourni par une sous-station qui alimente la

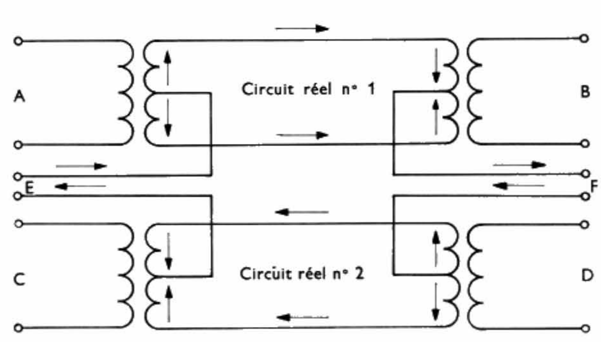


Fig. X-1 — Constitution d'un circuit fantôme par combinaison de deux circuits réels (les flèches indiquent les conducteurs traversés par les signaux du circuit fantôme)

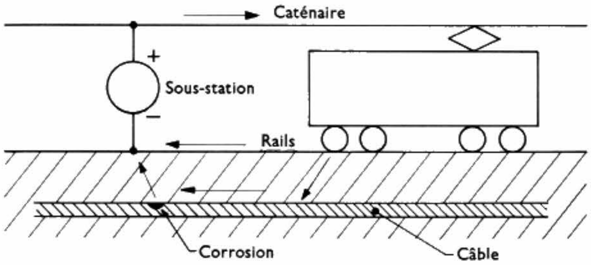


Fig. X-2 — La corrosion se produit dans la zone où le courant quitte le câble

caténaire (fig. X-2); ce courant alimente le moteur de la locomotive et retourne à la sous-station par les rails. Pratiquement, du fait de l'isolement insuffisant du rail par rapport au sol (4 Ω au kilomètre pour une file de rails), le retour du courant s'effectue en partie par le rail et en partie par le sol. Le courant emprunte le chemin de moindre résistance, en particulier, les enveloppes des câbles situées le long de la voie. Au voisinage de la sous-station, il entraîne avec lui une partie du plomb de l'enveloppe: ce phénomène porte le nom de *corrosion électrolytique*. À titre d'exemple, signalons qu'un courant de 1 A entraîne 34 kg de plomb en un an. On se protège contre cette corrosion en rendant l'enveloppe du câble électronégative par rapport au sol; ainsi, en chaque point et à tout instant, les courants pénètrent dans l'enveloppe.

Les procédés utilisés pour limiter la corrosion électrolytique sont le drainage et le soutirage.

— Le drainage consiste à relier le câble au rail dans les zones où celui-ci est électronégatif (fig. X-3). Si dans

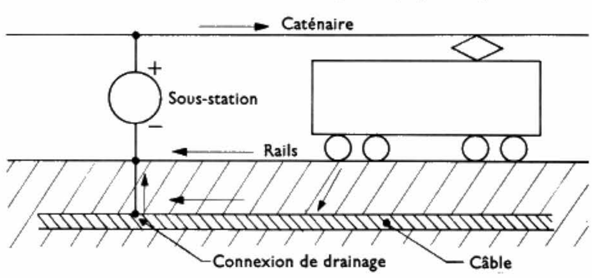


Fig. X-3 — Drainage

cette zone le rail n'est pas en permanence électronégatif, on intercale dans la connexion de drainage une diode assurant l'écoulement du courant, du câble vers le rail; ce procédé de protection porte le nom de *drainage électrique polarisé* (fig. X-4).

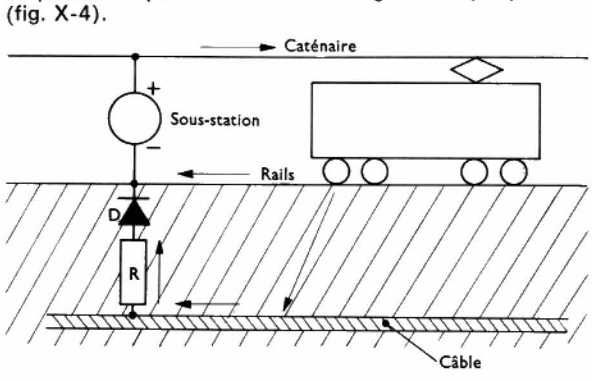


Fig. X-4 — Drainage polarisé; la résistance R limite l'intensité du courant de drainage

— Le soutirage consiste à utiliser une source d'énergie dont le pôle négatif est relié au câble (fig. X-5); on appelle également ce procédé *drainage électrique forcé*. Il est utilisé pour protéger les câbles dans les zones éloignées de la sous-station.

Dans les zones où les inversions de polarité du rail sont fréquentes, au lieu d'utiliser un drainage polarisé qui ne fonctionnerait que pendant une fraction très réduite

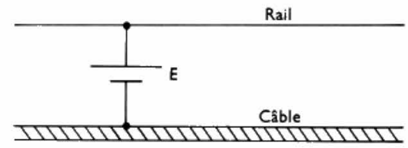


Fig. X-5

Soutirage (ou drainage électrique forcé)

de temps, on emploie un montage mixte: drainage-soutirage (fig. X-6); le soutirage fonctionne pendant que le drainage est inopérant et inversement.

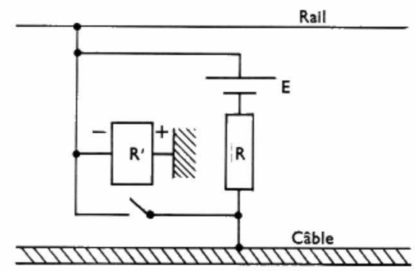


Fig. X-6

Drainage-soutirage

Si le rail est négatif, le relais R' est alimenté: il y a drainage. Si le rail est positif, le relais R' reste au repos: il y a soutirage par le générateur E

1.1.2. Lignes électrifiées en 25 kV. — Actuellement l'électrification se fait uniquement en courant industriel 25 kV-50 Hz. Si, en courant continu 1 500 V, on peut conserver des artères aériennes, sur les lignes électrifiées en 25 kV, la mise en câble est obligatoire. En effet, par suite de l'influence électrostatique de la caténaire sur les fils de la ligne téléphonique, sur une ligne à double voie, ceux-ci sont portés à un potentiel de 1 000 V si la ligne est à 10 m de la caténaire et de 6 000 V si elle n'est qu'à 5 m. Ce potentiel est indépendant de la longueur des lignes en parallèle et de la valeur de l'intensité du courant dans la caténaire.

Pour des raisons de sécurité du personnel, on utilise un câble dont l'enveloppe métallique est mise à la terre et forme écran électrostatique (le potentiel de l'enveloppe est ainsi nul). Remarquons que le potentiel électrostatique dépend surtout de la tension d'alimentation de la caténaire; en 1 500 V continu, sa valeur est négligeable et n'interdit pas l'utilisation de circuits aériens.

L'enveloppe métallique du câble annule l'influence électrostatique mais elle est inopérante contre l'influence électromagnétique qui se manifeste dès qu'il y a un courant i_c dans la caténaire. Tout conducteur parallèle à la caténaire sur une longueur l devient, en effet, le siège d'une force électromotrice induite: $E = k\, M \omega I_C$.

Dans cette formule k représente le facteur réducteur dû aux courants dans le rail et dans l'enveloppe métallique du câble; ces courants de sens opposé à i_c diminuent la f.é.m. induite. On démontre que:

$$k = k_R . k_E$$

k_R est le facteur réducteur du rail; on le diminue en reliant les rails par des connexions soudées et en améliorant l'isolement du rail par rapport à la terre.

k_E est le facteur réducteur de l'enveloppe du câble. Il est donné par l'expression $k_E = \frac{R_E}{L_E \omega}$ dans laquelle R_E est la résistance de l'enveloppe, L_E son inductance, et ω la pulsation du courant I_C. On réduit k_E en utilisant des enveloppes en aluminium plutôt qu'en plomb (ce qui diminue R_E) et en armant l'enveloppe par un feuillard de fer (ce qui augmente L_E).

En définitive, pour un câble à enveloppe de plomb $k = 0{,}2$ et pour un câble à enveloppe d'aluminium $k = 0{,}08$.

À titre d'exemple, considérons un câble à enveloppe de plomb posé à limite d'emprises, à 80 cm sous terre et qui est parallèle à la caténaire sur une longueur de 30 km. Si le courant dans la caténaire a une valeur efficace de 2 000 A, celle de la f.é.m. totale induite sera de 1 200 V.

M est le coefficient d'induction mutuelle entre la caténaire et le câble.

Pour éviter la détérioration du câble par claquage, il faut limiter la tension induite sur les circuits à 700 V environ par rapport à l'enveloppe et à l'armature mises à la terre. Cette limitation est obtenue par des translateurs dits de coupure (un par circuit) disposés judicieusement le long du câble. L'emploi de ces translateurs interdit l'utilisation du courant continu pour les signalisations échangées sur les circuits et contraint à utiliser des courants à 50 Hz ou à fréquence vocale.

En ce qui concerne la protection du personnel, tous les circuits sont terminés ou dérivés sur des translateurs. Si une intervention doit avoir lieu sur les circuits du câble et s'il n'est pas possible d'obtenir la consignation de la caténaire (c'est-à-dire sa mise hors tension), il est obligatoire de ne pas interrompre la continuité de l'armature de l'enveloppe ou des conducteurs et de mettre à la terre tout conducteur sur lequel on doit intervenir.

Les bruits créés par les tensions induites sur les circuits ne doivent pas atteindre, aux bornes du poste d'usager, une valeur supérieure à 1 mV; les fils des câbles utilisés sont suffisamment symétriques par rapport à l'enveloppe et par rapport à la terre pour que cette valeur ne soit pas atteinte.

1.2. Les circuits en câble. — Ils ont des affaiblissements plus grands que ceux des lignes aériennes car, d'une part, le diamètre des fils est plus faible (0,9 mm au lieu de 2,5 mm) et, d'autre part, les fils sont isolés par une mince couche de papier ou de polychlorure de vinyle au lieu de 40 cm d'air. L'affaiblissement passe ainsi de 0,0052 néper par kilomètre pour la ligne aérienne à 0,071 néper par kilomètre pour le câble. La portée d'un circuit est donc plus faible en câble qu'en ligne aérienne. On peut l'augmenter par le procédé de pupinisation ou par amplification (V. t. 2, Télécommunications).

1.2.1. La pupinisation. — La formule approchée donnant l'affaiblissement d'un circuit en câble en fonction de la résistance R, de la capacité C et de l'inductance L linéique $\alpha = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}$ montre qu'on peut diminuer α soit en diminuant R ou C, soit en augmentant L. La première méthode est trop coûteuse mais la deuxième est très utilisée.

Le procédé connu sous le nom de pupinisation consiste à intercaler à intervalles réguliers des bobines (appelées bobines de charge) en série sur chacun des conducteurs.

La distance entre deux bobines consécutives s'appelle « pas de pupinisation »; elle est égale à 1 830 m. Avec une bobine de 177 mH l'affaiblissement n'est plus que de 0,025 Np/km. On pourrait imaginer de réduire la valeur de l'affaiblissement en employant des charges plus grandes, mais par la même occasion on abaisse la fréquence de coupure du circuit (valeur au-delà de laquelle les fréquences ne sont plus transmises). Ainsi avec la charge de 177 mH la fréquence de coupure est limitée à 2 850 Hz (valeur au-dessous de laquelle la conversation devient de mauvaise qualité).

1.2.2. L'amplification. — Pour des circuits pupinisés de moyenne longueur, par exemple, inférieure à 60 km, l'affaiblissement de 1,5 Np (60 × 0,025) permet cependant à deux usagers d'échanger une conversation téléphonique. Au-delà de cette distance, il faut augmenter la puissance des courants téléphoniques à l'aide d'amplificateurs.

Si l'on amplifiait au départ, le niveau en ligne serait trop élevé et risquerait de perturber les autres circuits (phénomène de diaphonie). On amplifie donc chaque fois que la puissance en ligne devient trop faible. Or, un amplificateur (ou répéteur) ne transmet l'énergie que dans un sens et les conversations s'échangent sur les circuits dans les deux sens. On réalise donc à chaque point d'amplification un aiguillage (fig. X-7) constitué par un transformateur différentiel associé à un équilibreur qui doit reproduire l'impédance du circuit auquel il est raccordé. S'il en est ainsi, la puissance émise en A se partage également en B et C; la partie C rencontrant l'amplificateur 2 à l'envers est éliminée. La partie B, au contraire, est amplifiée et, arrivant dans le deuxième transformateur différentiel, se partage également en D vers l'aval et en E dans l'équilibreur

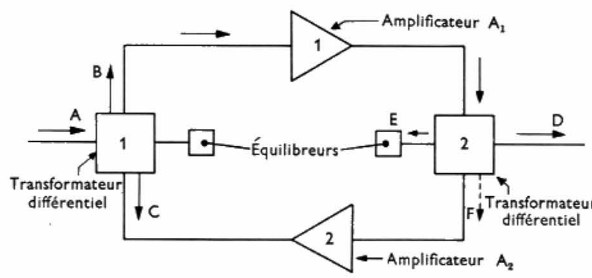


Fig. X-7 — Amplification sur circuit deux fils

où elle est dissipée en chaleur. Si l'équilibreur est mal réglé, une partie F de B se dirige vers l'amplificateur 2, est amplifiée, arrive sur le premier transformateur, et revient vers l'origine en créant des perturbations. Si, de plus, l'équilibreur du premier transformateur différentiel est déséquilibré, la puissance F après avoir traversé l'amplificateur 2 traverse l'amplificateur 1 et ainsi de suite: il y a amorçage.

Les risques d'amorçage augmentent évidemment avec le nombre de répéteurs; c'est pourquoi sur les circuits deux fils on ne doit pas utiliser plus de trois répéteurs, ce qui permet cependant de constituer des circuits de 200 km environ.

Pour les liaisons à grande distance, on est obligé d'utiliser des circuits quatre fils, c'est-à-dire des circuits sur lesquels on utilise une paire pour chaque sens de transmission (fig. X-8). Sur chaque paire on peut alors utiliser un nombre illimité de répéteurs. Il ne reste plus que deux transformateurs différentiels, l'un à l'origine, l'autre à l'extrémité du circuit.

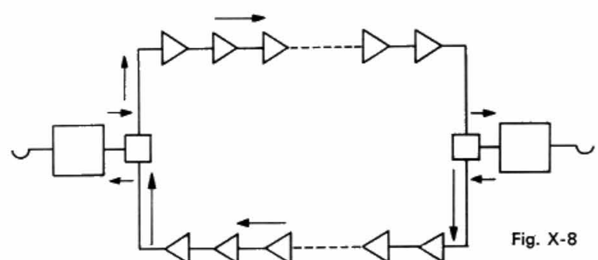


Fig. X-8

Circuit quatre fils

1.3. Systèmes à courants porteurs. — On sait qu'une conversation téléphonique de bonne qualité exige une bande de fréquences s'étendant de 300 à 3 400 Hz. Or, un circuit en ligne aérienne ou en câble peut transmettre des fréquences bien supérieures; on a donc pensé établir sur un même circuit plusieurs liaisons téléphoniques occupant chacune une bande de fréquences de 3,1 kHz et décalées les unes par rapport aux autres de 900 Hz, par exemple. Les différentes liaisons définissent ainsi un spectre de fréquences (fig. X-9). Pour décaler la bande de

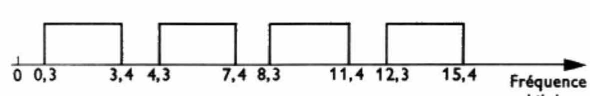


Fig. X-9 — Spectre de fréquences de systèmes à courants porteurs

fréquences 0,3-3,4 kHz dans la bande 4-7,4 kHz, par exemple, on utilise un appareil appelé modulateur que l'on associe à un démodulateur pour réaliser l'opération inverse. Le diagramme théorique d'un tel système dit à courants porteurs est représenté sur la figure X-10.

Nous avons déjà indiqué que la pupinisation d'un circuit diminuait sa fréquence de coupure: avec une charge lourde de 177 mH cette fréquence n'est plus que 2850 Hz; en utilisant une charge légère de 22 mH la fréquence de coupure est de 8 000 Hz; cela permet de faire passer deux conversations sur le même circuit.

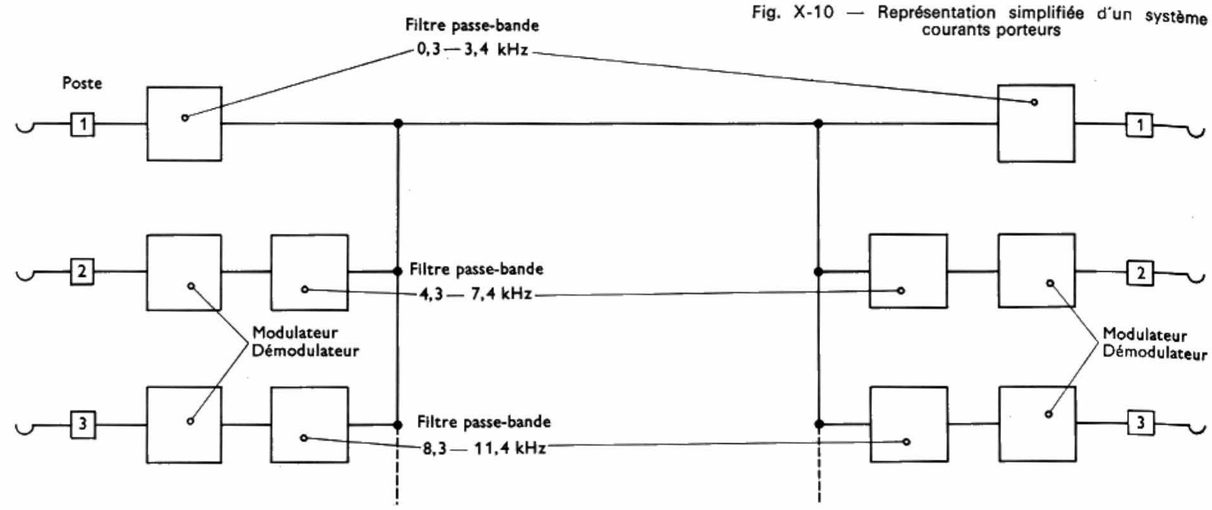


Fig. X-10 — Représentation simplifiée d'un système à courants porteurs

Sur des circuits non pupinisés, on peut installer des systèmes à courants porteurs à douze, soixante ou même trois cents voies. Pour éviter la diaphonie entre circuits voisins, on n'installe pas de tels systèmes sur toutes les paires d'un câble. Un circuit à courants porteurs est donc entouré, à l'intérieur du câble, par des circuits normaux.

L'affaiblissement sur les circuits exploités en haute fréquence est beaucoup plus grand que sur ceux exploités en fréquence vocale ; ainsi, sur les systèmes à douze voies on amplifie tous les 9 km environ.

1.4. Le câble coaxial. — Dans le cas où plus de trois cents voies sont nécessaires sur un circuit, on est obligé d'abandonner les circuits à paires symétriques et d'utiliser un câble à paires coaxiales. La paire est constituée par un conducteur central plein et un conducteur cylindrique creux de même axe, séparé du conducteur central par un isolant. Sur une telle paire, on peut faire passer jusqu'à 2 700 voies téléphoniques.

Le premier câble coaxial de la S.N.C.F. a été posé entre Paris et Toulouse.

Entre Paris et Vierzon le câble contient deux paires coaxiales entourées de huit quartes de « bourrage ». Les paires sont du type 1,2-4,4 ce qui signifie que le conducteur intérieur a un diamètre de 1,2 mm et le conducteur extérieur un diamètre intérieur de 4,4 mm. Une paire coaxiale est affectée à chacun des sens de transmission ; l'ensemble des deux paires est équipé pour réaliser trois cents circuits à quatre fils qu'on doit amplifier tous les 6 km environ.

Entre Vierzon et Toulouse, le câble est aérien et utilise comme support les pylônes des caténaires (fig. X-12). Il comprend une seule paire du type 2,1-8,0 équipé pour réaliser cent vingt circuits à quatre fils. Le conducteur central est en cuivre. Le conducteur extérieur en aluminium est entouré d'une tresse en acier inoxydable qui rend le câble autoporteur. L'affaiblissement de ce type de câble, moins grand que le précédent, permet de n'amplifier que tous les 12 km.

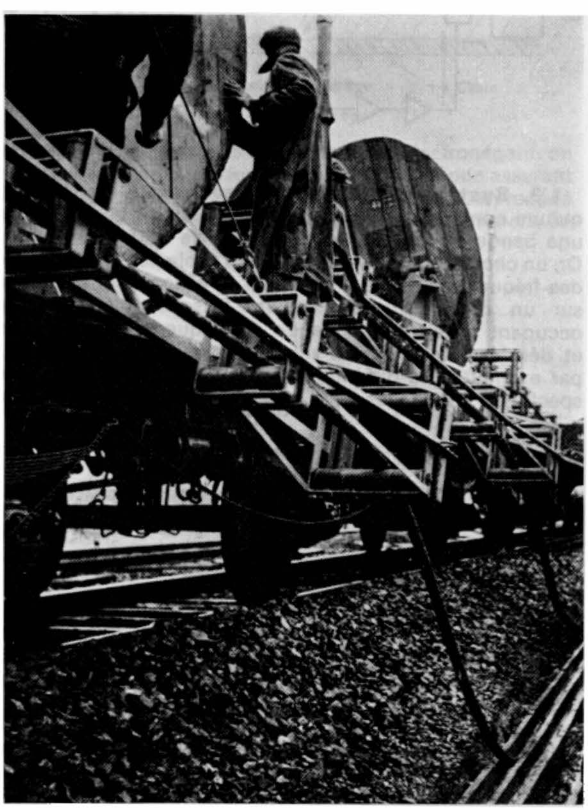


Fig. X-11 — Pose de câbles de télécommunications (*S.N.C.F.*)

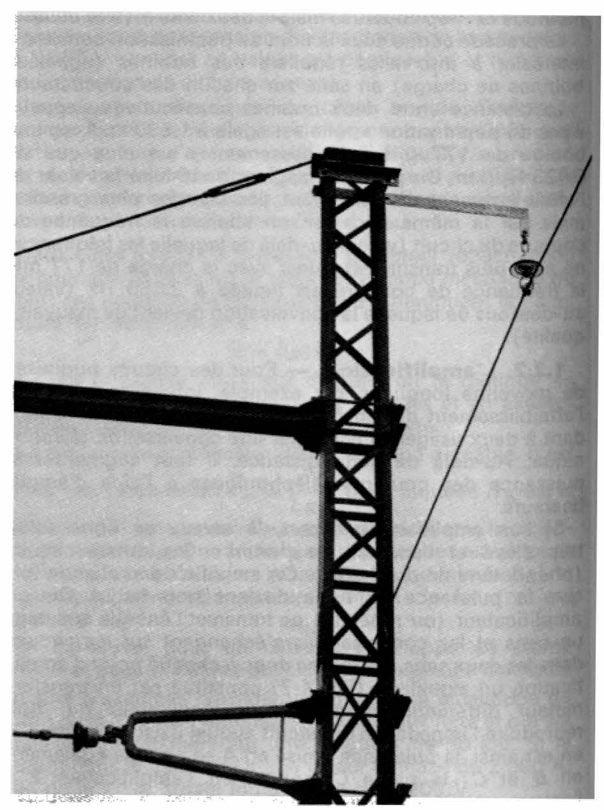


Fig. X-12 — Câble coaxial Vierzon-Toulouse sur poteau caténaire (*S.N.C.F.*)

2. TÉLÉPHONIE AUTOMATIQUE

Dans la plupart des techniques de télécommunications, les chemins de fer ont suivi la voie tracée par les P.T.T., mais dans le domaine de l'interconnexion automatique des autocommutateurs, c'est la solution choisie par la S.N.C.F., notamment en ce qui concerne les centres de transit quatre fils et les itinéraires de détournement, qui a été reprise par la suite par les P.T.T.

Un réseau ferré est, en général, divisé en régions (ou arrondissements, ou territoires) dépendant d'une direction centrale; les régions comprennent un certain nombre d'établissements: gares, dépôts, ateliers, etc. Pour assurer l'exercice du commandement, de l'information et du contrôle à tous les échelons de la hiérarchie, il est nécessaire de pouvoir établir facilement et rapidement des liaisons téléphoniques automatiques:

— à l'échelon local entre agents d'un même établissement (réseau local);

— à l'échelon régional entre le siège de la région et les établissements qui en dépendent (réseau régional);

— à l'échelon national entre la direction et les régions, d'une part, et entre régions, d'autre part, (réseau national).

Le réseau automatique résulte de la juxtaposition de ces trois types de réseaux: les réseaux locaux reliés entre eux par des liaisons à moyenne distance qui constituent le réseau régional, les réseaux régionaux reliés entre eux par des liaisons à grande distance qui constituent le réseau national.

2.1. Le réseau local. — C'est l'ensemble des liaisons reliant les usagers d'un établissement à un autocommutateur téléphonique. Les impulsions de numérotation sont échangées en courant continu.

2.2. Le réseau régional. — C'est l'ensemble des liaisons assurant l'interconnexion des autocommutateurs locaux de la région (fig. X-13). Le siège de la région est desservi par un autocommutateur qui constitue un centre de transit.

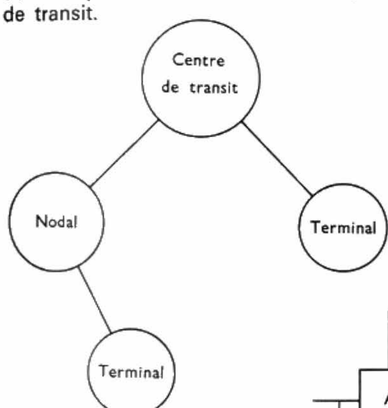


Fig. X-13

Réseau régional

Les centres de la région sont appelés « terminaux » lorsqu'ils sont rattachés au centre de transit, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un centre appelé nodal.

Les circuits du réseau régional sont des circuits deux fils s'ils n'excèdent pas 200 km. Pour des distances supérieures on utilise des circuits quatre fils.

2.3. Le réseau national. — C'est l'ensemble des liaisons assurant l'interconnexion entre les centres de transit et l'autocommutateur de la Direction centrale qui constitue le centre de transit général. Le schéma théorique du réseau national est représenté sur la figure X-14. Il montre que tous les centres de transit sont reliés au centre de transit général et que certains transits sont reliés entre eux.

La liaison entre deux centres de transit, *F* et *G*, par exemple, s'effectue normalement par les circuits directs de *F* vers *G*. Dans le cas d'occupation de tous les circuits ou de dérangement affectant tous les circuits du câble,

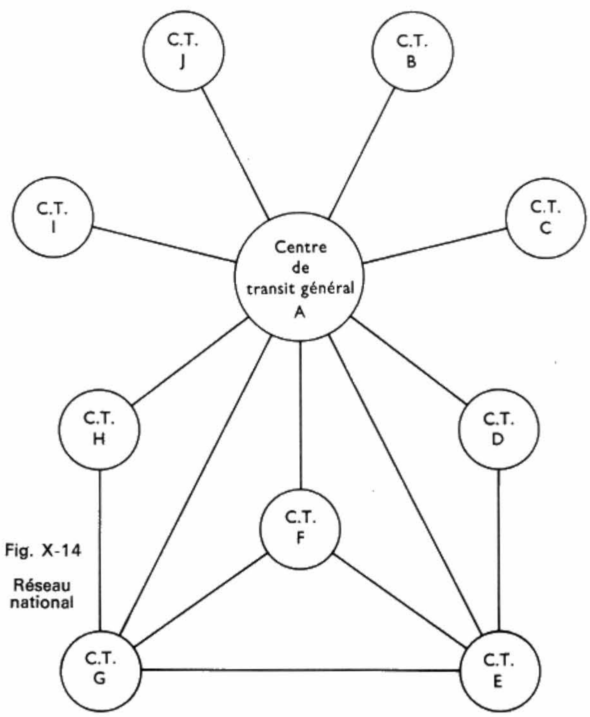


Fig. X-14

Réseau national

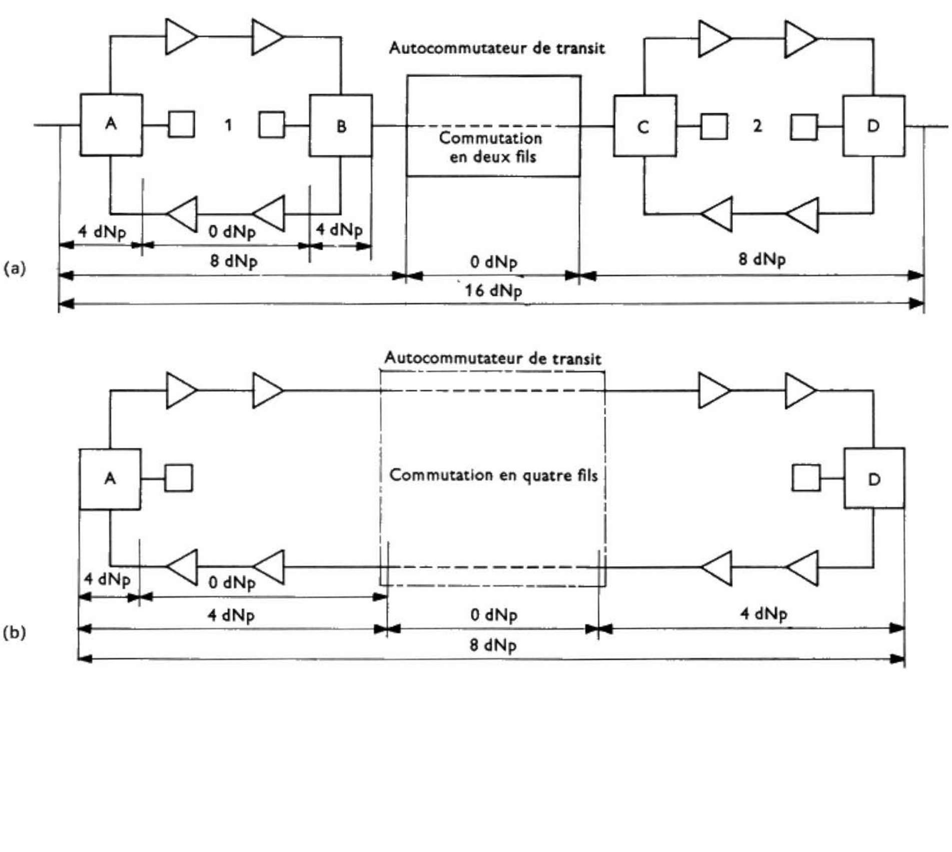


Fig. X-15

Comparaison entre la commutation deux fils (a) et la commutation quatre fils (b)

une voie détournée est prévue par le centre de transit *E*. Afin de ne pas augmenter le nombre de centres de transit empruntés par une liaison, un seul détournement est autorisé. Tous les circuits utilisés sont du type quatre fils. Dans les centres de transit la commutation se fait en quatre fils qu'il s'agisse de connecter deux circuits quatre fils ou un circuit quatre fils et un circuit deux fils ou même deux circuits deux fils. L'intérêt de la commutation quatre fils (V. fig. X-15) est de donner pour l'ensemble des deux circuits connectés un affaiblissement égal à chacun d'eux pris isolément et d'augmenter la stabilité par suppression des deux transformateurs différentiels *B* et *C*.

2.4. Plan général de numérotation. — Ce plan qui a priori peut paraître secondaire a une très grande importance. Il doit respecter la hiérarchie entre les trois réseaux : local, régional et national. Dans ce but la prise d'un réseau est subordonnée à la composition d'un préfixe :

— le chiffre 1 pour le réseau local ;

— le chiffre 8 pour le réseau régional ;

— les nombres 21 à 79 pour le réseau national (caractérisant chacun une région).

Les nombres 00 à 09 correspondent à l'aiguillage vers les services spéciaux :

— 00 pour le manuel associé ;

— 01 pour la prise directe du réseau P.T.T., etc.

Le numéro d'appel d'un usager est formé de quatre chiffres *MCDU*. Pour appeler cet usager, on compose au cadran :

— 1 *MCDU* si on appartient au même réseau local ;

— 8 *MCDU* si on appartient au même réseau régional ;

— *PQ MCDU* si la région du demandé a pour indicatif *PQ*.

2.5. Les signalisations. — Supposons que l'usager *a* de l'autocommutateur *A* (fig. X-16) veuille joindre l'usager *d* de l'autocommutateur *D* ; *a* compose au cadran le numéro de *d* tel qu'il a été défini au paragraphe précédent. Dans l'exemple choisi il compose 343 650 (numéro du réseau national car *a* et *d* ne font partie ni du même réseau local, ni du même réseau régional).

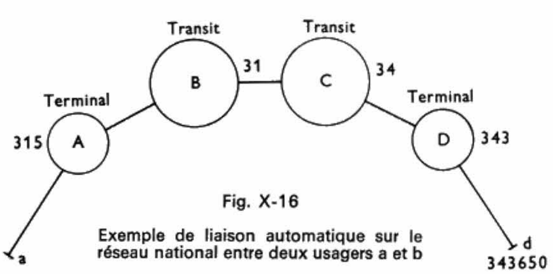


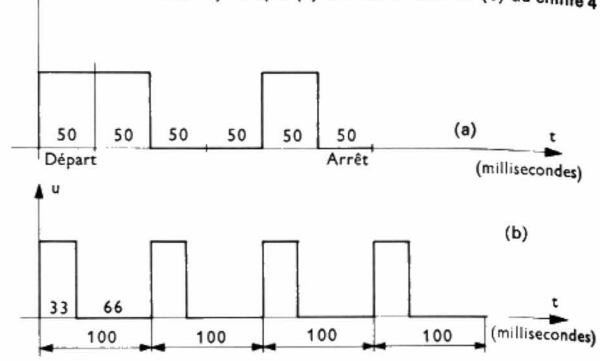
Fig. X-16

Exemple de liaison automatique sur le réseau national entre deux usagers a et b

Tous les autocommutateurs utilisés comportent des enregistreurs-traducteurs qui, recevant le numéro demandé, l'enregistrent et se substituent au demandeur pour la suite des opérations d'établissement de la communication. Le numéro de *d* est conservé dans l'enregistreur *A* qui, après avoir analysé les deux premiers chiffres du demandé (34) cherche un circuit libre vers l'autocommutateur *B*. L'ayant trouvé, il échange un dialogue pour savoir si *B* a un enregistreur libre qui recevra la numérotation emmagasinée. Ce dialogue consiste en un échange de signaux selon un code déterminé. Le numéro du demandé est transmis ainsi à *B*, puis à *C* et à *D*. L'autocommutateur *D* déclenche alors l'appel de l'usager *d*.

Signalons que sur le réseau national, pour transmettre plus rapidement la numérotation, on la transforme suivant un code arythmique à quatre moments (fig. X-17). Ceux-ci sont précédés d'un moment positif, caractéristique du début de l'émission du chiffre et suivis d'un moment nul (absence de courant) caractéristique de la fin. La durée totale d'émission d'un chiffre est donc de 300 ms alors qu'en code décimal (c'est-à-dire code émis par le cadran) la durée est fonction du chiffre émis (100 ms pour le chiffre 1, 1 000 ms pour le chiffre 0). Le code décimal n'est conservé que pour les réseaux locaux et régionaux.

Fig. X-17 — Comparaison entre les représentations en code arythmique (a) et en code décimal (b) du chiffre 4



Un seul détournement étant possible entre centres de transit, dès qu'il a eu lieu, un signal du code arythmique (absence de polarité pour les quatre moments) est envoyé vers les transits suivants, avant les signaux de numérotation pour interdire un second détournement.

Sur les circuits à deux fils du réseau régional, la signalisation et la numérotation sont transmises en courant alternatif 50 Hz car le courant continu n'est pas retransmis par les amplificateurs.

Sur les circuits à quatre fils du réseau national ou du réseau régional, elles sont transmises en fréquence vocale dont la valeur dépend de la nature du circuit (pupinisé ou non, à courants porteurs, etc.).

3. TÉLÉPHONIE SÉLECTIVE

Lorsqu'il est nécessaire d'établir rapidement des liaisons fréquentes et de courte durée entre des postes échelonnés le long d'une ligne l'utilisation de la téléphonie automatique exige trop de circuits. Il est préférable de raccorder tous les postes en dérivation sur un circuit unique.

On distingue deux types de circuits sélectifs :

— ceux *à sélection centralisée* ainsi nommés car l'appel peut être lancé d'un seul poste dit central vers les autres postes dits secondaires ; le poste central est en écoute permanente et les postes secondaires s'annoncent à la voix ;

— ceux *à sélection décentralisée* où un poste quelconque peut appeler n'importe quel autre.

3.1. Circuits sélectifs centralisés

3.1.1. Généralités. — La principale utilisation concerne la régulation du trafic ferroviaire qui est effectuée du poste de commandement de la région par un agent appelé *régulateur*. Celui-ci doit pouvoir se mettre en liaison très rapidement avec les gares et les postes d'aiguillage de la ligne pour établir le graphique réel de circulation des trains et prendre au besoin des décisions (par exemple faire garer un train de marchandises devant un train rapide en retard). Le circuit sélectif centralisé utilisé est appelé *circuit de régulation-exploitation*. L'appel peut être lancé vers une gare, un groupe de gares ou l'ensemble des gares (fig. X-18).

Sur les voies électrifiées, la mise sous tension des caténaires est réalisée par l'intermédiaire de sous-stations régulièrement réparties le long de la ligne ; pour la coupure ou le rétablissement du courant sur les différents tronçons, ces sous-stations sont télécommandées par un poste central appelé « commande centralisée des sous-stations » (C.C.S.) (fig. X-19).

Le chef de la C.C.S. doit pouvoir joindre les gares (pour les coupures manuelles de courant sur les voies de service) et les sous-stations où se trouvent les agents chargés de l'entretien. Le circuit sélectif utilisé dans ce but porte le nom de *régulation-traction*. Il permet également aux gares de demander des coupures d'urgence du courant en cas d'incident.

On emploie également les circuits sélectifs centralisés dans les triages où ils permettent au poste de commandement du triage (P.C.T.) de recueillir les informations en provenance des différents postes.



Fig. X-18 — Table de régulation exploitation (*S.N.C.F.*)

3.1.2. Le poste central. — L'opérateur dispose d'un microphone, d'un haut-parleur et d'un pupitre pour l'émission des appels sélectifs. Le dispositif émetteur envoie en ligne des appels codés ; chaque code correspond à un poste secondaire. Le codage le plus répandu est celui du système Western. Un code est constitué par une suite d'impulsions, dont le nombre total est fixe (17, 19, 21 ou 23) et qui sont émises en trois groupes (ou trains) avec un minimum de deux impulsions par groupe. Si le total des impulsions est de 17, le nombre de codes possible est de 78, ce qui est suffisant pour le nombre de postes secondaires répartis sur une ligne.

La figure X-20 représente le code 4-3-10 avec des impulsions en courant continu (positif ou négatif) et le même code en courant alternatif 50 Hz (présence ou absence de courant) ; chaque impulsion dure 125 ms donc la période est de 250 ms et la fréquence des impulsions d'un train est de 4 Hz. Avant l'envoi du premier train, on met la ligne sous tension pendant 0,9 s ; l'intervalle entre deux trains est également de 0,9 s. À la fin du troisième train, l'intervalle de 1,8 s correspond au retour d'appel émis par le poste secondaire appelé ; une dix-huitième impulsion libère alors le sélecteur du poste appelé et à la fin de cette impulsion le dispositif émetteur redevient libre. Le code est donc émis (dans le cas de dix-sept impulsions) en 7,15 s.

Sur les lignes aériennes où il n'y a pas d'amplification, l'appel en courant continu alterné convient parfaitement. Mais sur les câbles, pour conserver le même courant d'appel, il faudrait utiliser des translateurs à circuit magnétique important et donc coûteux ; de plus les stations de répéteurs devraient être équipées de répétiteurs d'impulsions car les amplificateurs sont inopérants en courant continu. Ces raisons ont conduit à substituer une source alternative à 50 Hz à la source de courant continu.

Le dispositif émetteur a été constitué successivement par un appareillage mécanique (clé individuelle) puis

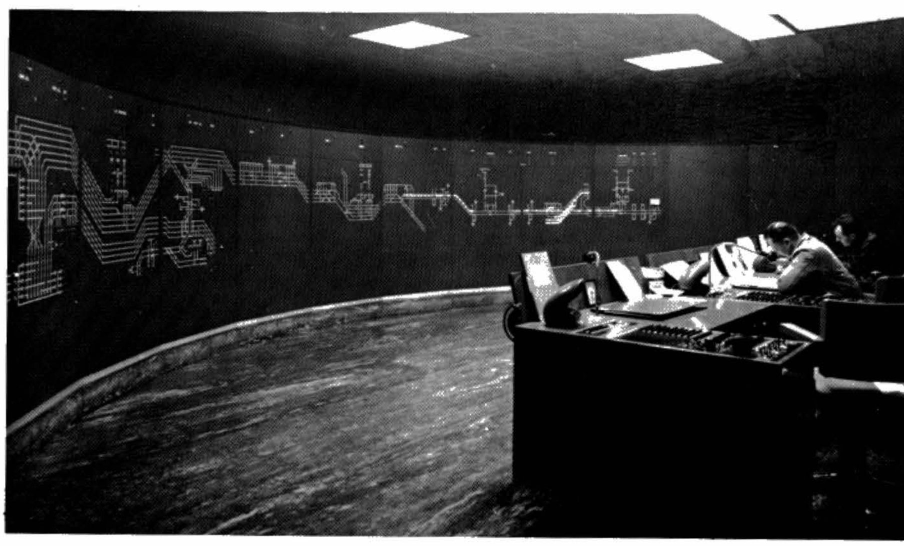


Fig. X-19

Commande centralisée des sous-stations (*S.N.C.F.*)

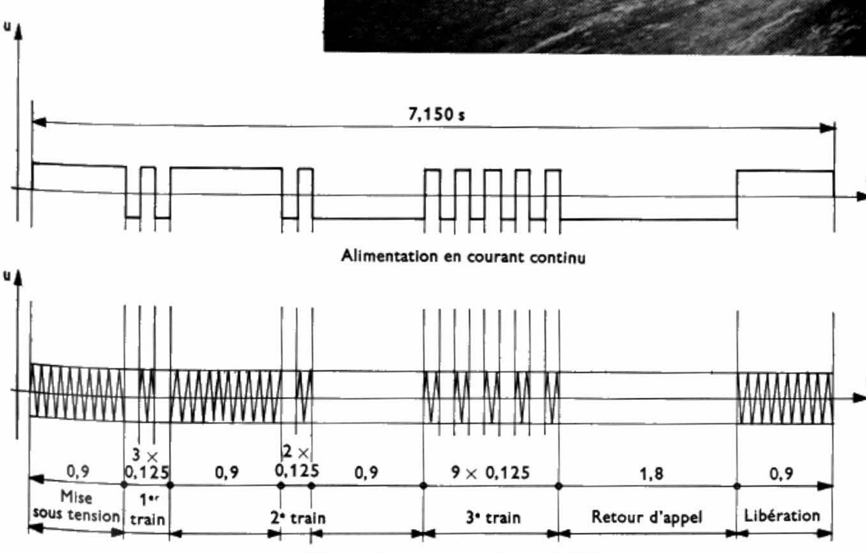


Fig. X-20

Diagramme du courant d'appel en ligne correspondant au code 4-3-10

électromécanique (combineur puis système tout à relais) et maintenant électronique. L'opérateur dispose d'un pupitre muni de boutons en nombre égal à celui des postes secondaires; l'action sur un bouton déclenche l'envoi en ligne du code correspondant au poste que l'on veut appeler.

3.1.3. Le poste secondaire. — Il dispose d'un appareil appelé *sélecteur* qui, recevant le code sur lequel il est préréglé, déclenche la sonnerie d'appel du poste; si le code reçu est différent, le sélecteur revient au repos sans déclencher la sonnerie. Le sélecteur peut être électromécanique du type Western ou du type tout à relais ou électronique.

Pendant le fonctionnement de la sonnerie, le sélecteur du poste émet en ligne un courant dit *de retour d'appel* qui est reçu par l'opérateur du poste central et qui lui indique que l'appel a bien été reçu par un poste secondaire.

Ce contrôle d'appel est reçu pendant 1,8 s au poste central; l'émetteur envoie alors la dix-huitième impulsion qui libère le sélecteur du poste appelé mais la sonnerie du poste secondaire tinte tant que l'on n'a pas décroché.

3.1.4. Les circuits utilisés. — L'appel en courant alternatif à 50 Hz s'applique aussi bien aux circuits aériens qu'aux câbles.

La figure X-21 montre le schéma d'un circuit à quatre fils, sur câble pupinisé et amplifié. L'appel est émis en 50 Hz sur le fantôme; il est régénéré dans les stations de répéteurs par un dispositif à relais appelé signaleur.

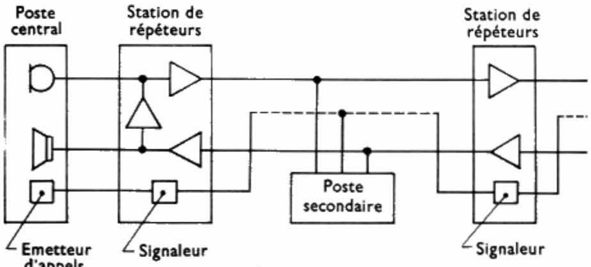


Fig. X-21 — Circuit sélectif centralisé sur câble

3.2. Circuits sélectifs décentralisés. — Ils sont utilisés pour l'échange des informations entre les gares d'une section de ligne; dans le système Ericsson une vingtaine de gares peuvent être raccordées sur le même circuit. De chaque gare on peut émettre un appel mais on doit s'assurer au préalable, par une écoute discrète, qu'aucune conversation n'est en cours sur le circuit.

Vu la faible longueur des circuits, les liaisons sélectives sont réalisées en deux fils. Elles sont omnibus si elles relient toutes les gares d'une même ligne, semi-directes si elles ne relient que les gares importantes.

3.2.1. Le code Ericsson. — Le système Ericsson utilise un code décimal, constitué d'une succession d'impulsions à 50 Hz, à total variable n'excédant pas 10; il peut être composé d'un ou deux trains émis à l'aide d'un cadran d'appel ordinaire. Avec le code à un train, il existe 10 codes différents (de 0 à 9), 8 seulement sont utilisés, le 1 et le 2 risquant d'entraîner un fonctionnement défectueux du système. Avec deux trains d'impulsions, sur les 20 codes différents (de 00 à 20), 17 codes sont utilisés.

Un sélecteur électromécanique reçoit les impulsions et ne déclenche la sonnerie d'appel que sur le poste dont le sélecteur est préréglé sur le code reçu.

3.2.2. Les postes. — Outre les organes de conversation, le cadran d'appel et le sélecteur, ils comprennent:

— une lampe blanche de réception d'appel;
— une lampe rouge de contrôle d'occupation de la ligne;
— une lampe verte de contrôle d'occupation du cadran ou du dispositif émetteur d'appel.

Après avoir décroché, l'opérateur s'assure à l'écoute que le circuit est libre; en armant son cadran il provoque l'allumage de la lampe verte de son poste et de toutes les lampes rouges des autres. Si la numérotation est à un chiffre, la lampe verte reste allumée pendant toute la rotation du cadran et s'éteint quelques secondes plus tard. Si elle est à deux chiffres, la lampe verte reste allumée pendant l'intervalle de temps qui s'écoule entre les deux trains, à condition que cet intervalle soit inférieur à 4 s; dans le cas contraire l'émission du premier chiffre est annulée.

3.3. Autres circuits sélectifs

3.3.1. Circuit d'alarme-traction. — C'est un circuit qui aboutit à la commande centralisée des sous-stations et qui relie des postes d'extérieur répartis tous les kilomètres environ le long d'une voie électrifiée (fig. X-22) Ces

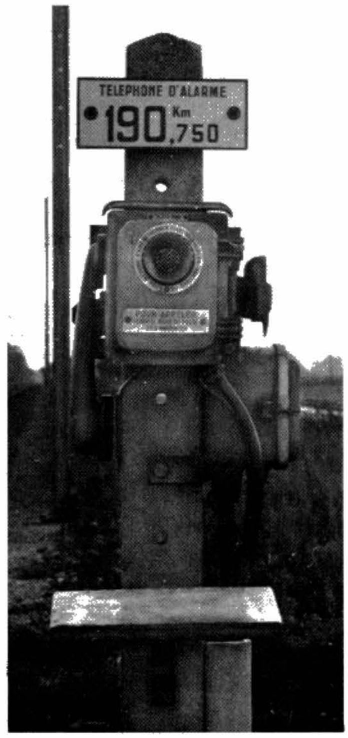


Fig. X-22

Téléphone d'alarme traction

postes permettent à tout agent circulant sur la voie de signaler un danger et d'obtenir d'urgence la coupure du courant; ils donnent également la possibilité aux mécaniciens des trains circulant sur le tronçon qui vient d'être privé de courant, d'être renseignés sur le motif de la coupure. Dans le cas de travaux d'entretien de la caténaire, ils sont utilisés pour demander à la C.C.S. la coupure du courant sur un tronçon déterminé. Si l'appel intéresse le mouvement des trains, la C.C.S. peut mettre le correspondant en communication avec le régulateur de l'exploitation.

Le circuit utilisé est à quatre fils: une paire est affectée à l'émission et l'autre à la réception. Le fantôme permet l'appel. Quand tous les postes d'extérieur sont au repos, un oscillateur à 50 Hz, situé à l'extrémité du circuit, alimente un relais sensible placé à l'origine. Au décrochage du poste (obtenu par soulèvement du bras mobile) un contact court-circuite le fantôme et shunte l'oscillateur à 50 Hz: le relais sensible se désexcite et déclenche l'appel à la C.C.S. En revanche celle-ci ne peut pas appeler les postes (fig. X-23).

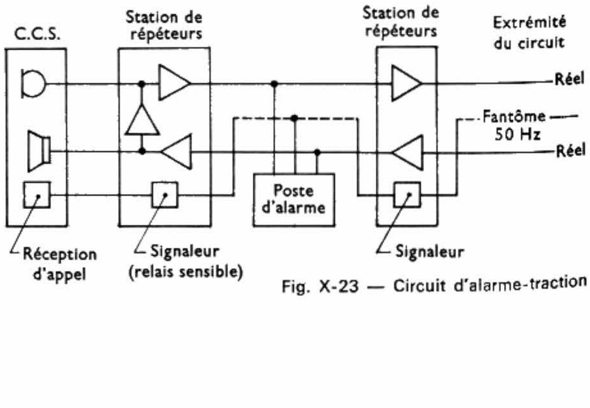


Fig. X-23 — Circuit d'alarme-traction

3.3.2. Circuit travaux. — C'est un circuit, établi entre deux gares, qui permet aux équipes d'entretien de la voie ou des caténaires d'entrer en liaison avec les gares encadrantes au moyen d'un poste téléphonique portatif. Dans ce but des prises étanches sont disposées sur le circuit tous les kilomètres environ.

L'appel est émis en 50 Hz dans le sens gare vers poste et en 20 Hz environ, à l'aide d'une magnéto, dans le sens poste vers gare.

4. TÉLÉGRAPHIE

Ce n'est que récemment, grâce à la mise au point du téléimprimeur, appareil qui se présente sous la forme d'une machine à écrire, que la télégraphie a pu se développer au chemin de fer.

L'utilisation des téléimprimeurs est intéressante pour la gestion des wagons. En effet, dans un réseau ferré dont le trafic est croissant, on se trouve placé devant l'alternative suivante :

— augmenter le nombre de wagons ;
— conserver le même nombre de wagons et améliorer leur utilisation en diminuant les durées d'immobilisation, en particulier dans les triages.

La deuxième solution semble la plus économique : chaque wagon est fiché dès qu'il arrive dans un triage ou une gare de la région ; les indications de la fiche sont transmises chaque jour au poste de commandement de la région et, de là, à l'organisme central de répartition des wagons situé à la direction centrale. Les informations entre triages, gares, P.C. régional et organisme central de répartition des wagons sont transmises plus rapidement et avec moins de risques d'erreur par téléimprimeur que par téléphone. En effet, les messages échangés comportent de nombreux chiffres (numéro de wagons, de trains, etc.) qui pourraient être mal interprétés par téléphone ; de plus, la durée des communications pouvant atteindre plusieurs dizaines de minutes, il est préférable de recevoir le message par téléimprimeur ce qui ne nécessite pas la présence continue d'un agent à la réception et permet de garder une trace écrite.

4.1. Le téléimprimeur. — C'est un appareil qui émet des impulsions de courant continu à polarité positive ou négative et de durée constante appelées *moments* (fig. X-24). Dans le code à cinq moments chaque lettre, chiffre

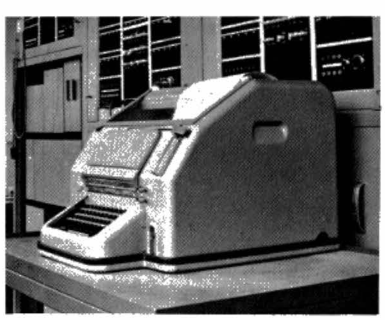


Fig. X-24

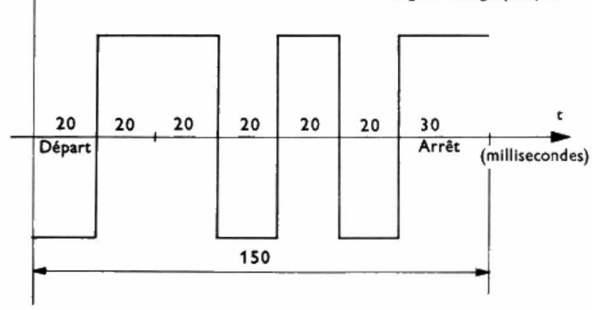
Téléimprimeur utilisé par la S.N.C.F. (*SAGEM*)

ou signe typographique est représenté par un ensemble de cinq moments précédés d'un signal de départ de même durée et de polarité négative et suivis d'un signal d'arrêt de durée au moins égale à un moment et demi et de polarité positive. Si la durée d'un moment est de 20 ms, on dit que la vitesse est de 50 bauds ; un signal télégraphique complet dure 150 ms (fig. X-25).

En utilisant cinq moments, dont chacun peut présenter deux états électriques différents, on réalise 2^5 soit 32 combinaisons. Cela peut paraître insuffisant pour transmettre les lettres, chiffres, signes de ponctuation, etc. Mais le téléimprimeur est conçu de telle façon que s'il reçoit une combinaison particulière appelée *inversion lettre*, toutes les combinaisons reçues par la suite correspondront à des lettres ; s'il reçoit une autre combinaison appelée *inversion chiffre*, les combinaisons reçues ultérieurement correspondront à des chiffres ou à des signes de ponctuation. Cet artifice permet d'affecter le même code à une lettre

Fig. X-25

Signal télégraphique



et à un chiffre ou à un signe de ponctuation, le nombre de combinaisons devient donc apparemment égal à soixante-deux.

Le code utilisé est dit arythmique car, grâce aux moments de départ et d'arrêt, l'émission des différents signaux télégraphiques peut se faire à un rythme quelconque (ce qui n'était pas le cas des appareils qui ont précédé le téléimprimeur). À la suite de la frappe d'un caractère sur le clavier, le téléimprimeur effectue la codification et l'émission du signal télégraphique correspondant. Inversement, recevant des impulsions, le téléimprimeur les garde en mémoire jusqu'à ce qu'il ait reçu le signal complet puis il traduit ce signal et imprime le caractère correspondant.

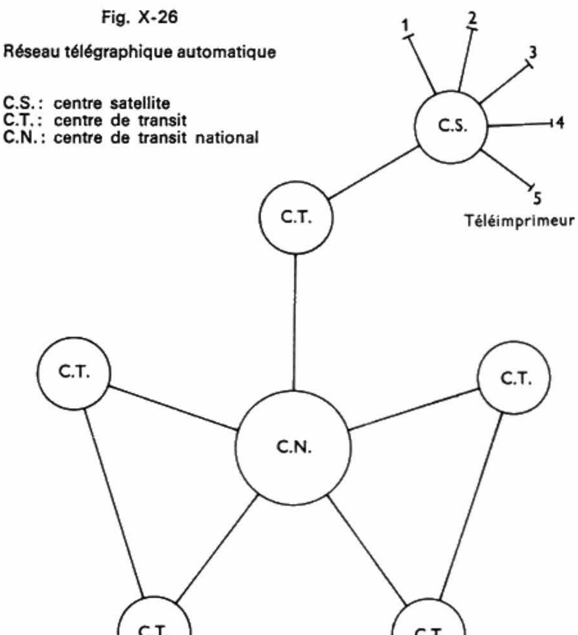
Le texte imprimé sur page peut également être reçu, sur une bande de papier sur laquelle sont perforés les trous correspondant à des moments positifs. La perforatrice qui est utilisée pour cette opération permet également de préparer localement un message sur bande. Grâce à un transmetteur automatique dans lequel on insère la bande, on peut ensuite transmettre les signaux télégraphiques à la vitesse maximale de 50 bauds.

4.2. Le réseau télégraphique. — Entièrement automatisé, il permet à un usager quelconque d'obtenir un correspondant en composant sur son clavier un numéro de trois chiffres. Les téléimprimeurs sont reliés à des autocommutateurs satellites (fig. X-26) sur lesquels on peut raccorder dix appareils ; les satellites sont en liaison avec des autocommutateurs de transit, tous reliés à un centre national de transit. Exceptionnellement, deux centres de transit peuvent être reliés entre eux, ce qui permet un détournement au cas où les circuits de la voie normale seraient tous indisponibles ; de plus si le téléimprimeur de

Fig. X-26

Réseau télégraphique automatique

C.S. : centre satellite
C.T. : centre de transit
C.N. : centre de transit national



l'usager destinataire est occupé, l'usager est aiguillé automatiquement sur un autre téléimprimeur dit de débordement.

4.3. Les circuits. — Le signal télégraphique ne peut être transmis sous forme de courant continu que sur des distances de quelques kilomètres. Au-delà, on utilise une transmission par courant alternatif dite *modulation de fréquence;* à l'émission, la polarité positive est remplacée par une tension de fréquence $f_0 - f$ et la polarité négative par une tension de fréquence $f_0 + f$, avec $f = 30$ Hz. À la réception les deux fréquences sont séparées par des filtres puis détectées et envoyées sur un relais sensible polarisé qui reconstitue le signal continu. La bande de fréquences théorique est donc égale à $2f$ soit 60 Hz; pratiquement la transmission d'une voie télégraphique occupe une largeur de 120 Hz, beaucoup plus faible que pour une communication téléphonique.

Pour les liaisons entre transits ou entre transit et satellite, les circuits à quatre fils qui ont une bande passante de 300 à 3 400 Hz permettent la transmission de vingt-quatre voies télégraphiques car on utilise une série de fréquences f_0 égales à 420 Hz, 540, 660, . . ., jusqu'à 3 180 Hz.

Ce système de transmission de plusieurs voies télégraphiques, qui s'apparente au système à courants porteurs, porte le nom de *télégraphie harmonique*.

Pour les liaisons entre le téléimprimeur et le satellite, le plus souvent on fait appel aux circuits physiques (relations à courte distance) ou aux voies de télégraphie harmonique, mais on peut utiliser un système dit « bivocal ». Sur un circuit à deux fils ce système permet d'exploiter simultanément une voie télégraphique et une voie téléphonique en amputant celle-ci des fréquences comprises entre 1 500 et 2 000 Hz. Comme celui de télégraphie harmonique, ce système est à modulation en fréquence; il utilise la fréquence de 1 860 Hz pour un sens de transmission et de 1 680 Hz pour l'autre sens.

5. TRANSMISSION DE DONNÉES

Les ordinateurs ont permis de traiter rapidement certains problèmes du chemin de fer: calcul de la solde du personnel, gestion des stocks et des approvisionnements, gestion des wagons, location des places, etc.

Les informations sont introduites dans l'ordinateur sous forme de caractères codés analogues à ceux de la télégraphie; le code utilise sept moments (au lieu de cinq) auxquels on ajoute un moment redondant de parité qui permet de détecter une erreur éventuelle. Pour obtenir une utilisation optimale de l'ordinateur, il faut introduire les informations sous une forme convenable (un nombre bien déterminé de caractères pour chaque ligne par exemple) et à une cadence comparable à sa vitesse de fonctionnement.

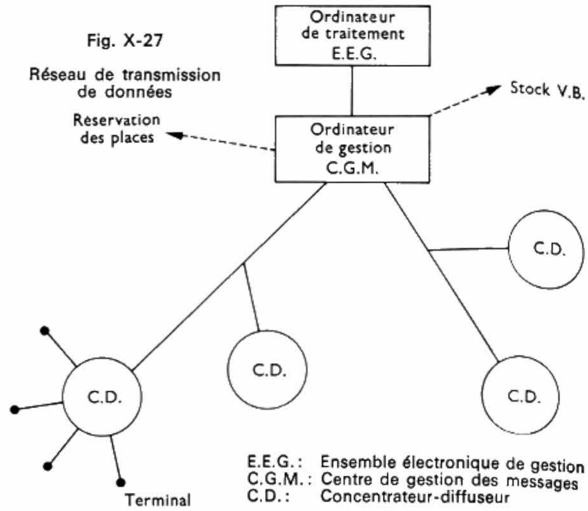
C'est dans ce but qu'on a créé un réseau dit de transmission de données (fig. X-27). Des postes terminaux qui se présentent sous la forme de téléimprimeurs permettent l'entrée des informations et la sortie des résultats (fig. X-28). Ils sont reliés à des concentrateurs-diffuseurs par un réseau dit capillaire qui assure la transmission des données à faible vitesse (de 110 à 220 bauds).

Les concentrateurs-diffuseurs recueillent les informations venant des terminaux, contrôlent leur forme et leur valeur et les acheminent à moyenne vitesse (2 400 bauds) vers un ordinateur de gestion appelé centre de gestion des messages (C.G.M.) associé à l'ordinateur de traitement des informations; ces concentrateurs-diffuseurs peuvent travailler à moyenne vitesse car ils émettent vers le C.G.M. non pas des messages complets mais des blocs pouvant être constitués de trois lignes, deux lignes successives pouvant appartenir à des messages en provenance de deux terminaux différents.

Le C.G.M. contrôle de nouveau la forme et la valeur des informations, les met en mémoire avant et après le traitement par l'ordinateur et les distribue en retour vers les concentrateurs-diffuseurs et les terminaux.

Fig. X-27

Réseau de transmission de données



6. RADIO

On peut classer les utilisations de la radio au chemin de fer en deux grandes catégories:

— liaisons localisées;
— liaisons à grande distance.

6.1. Liaisons localisées. — Les premières liaisons radio utilisées ont été celles des triages. Avant d'indiquer les différentes liaisons utilisées, nous allons donner quelques renseignements sur le fonctionnement d'une gare de triage (fig. X-29).

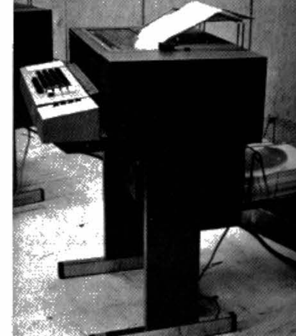
Celle-ci comprend trois parties ou faisceaux, constituées chacune d'un certain nombre de voies:

— le faisceau d'arrivée;
— le faisceau de débranchement et de formation;
— le faisceau de départ.

Un train, reçu sur le faisceau d'arrivée, est tout d'abord débranché, c'est-à-dire séparé en wagons ou en groupes

Fig. X-28

Poste terminal de transmission de données (*S.N.C.F.*)



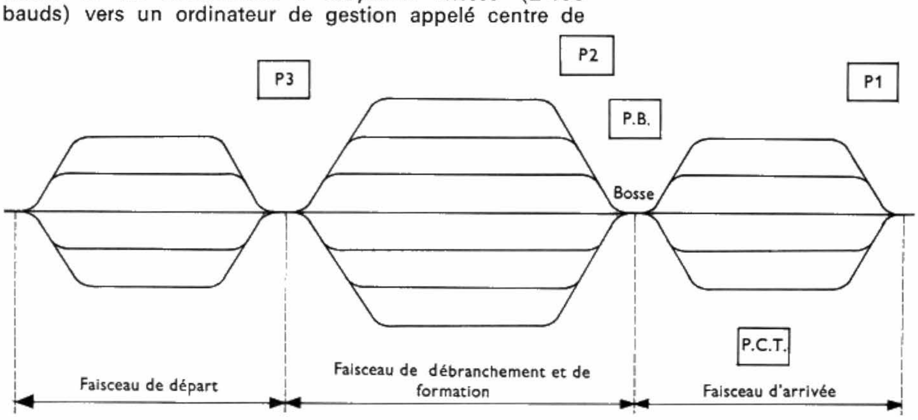


Fig. X-29

Schéma d'un triage
P1, P2, P3 sont des postes du triage
P.B. est le poste de bosse
P.C.T. est le poste de commandement du triage

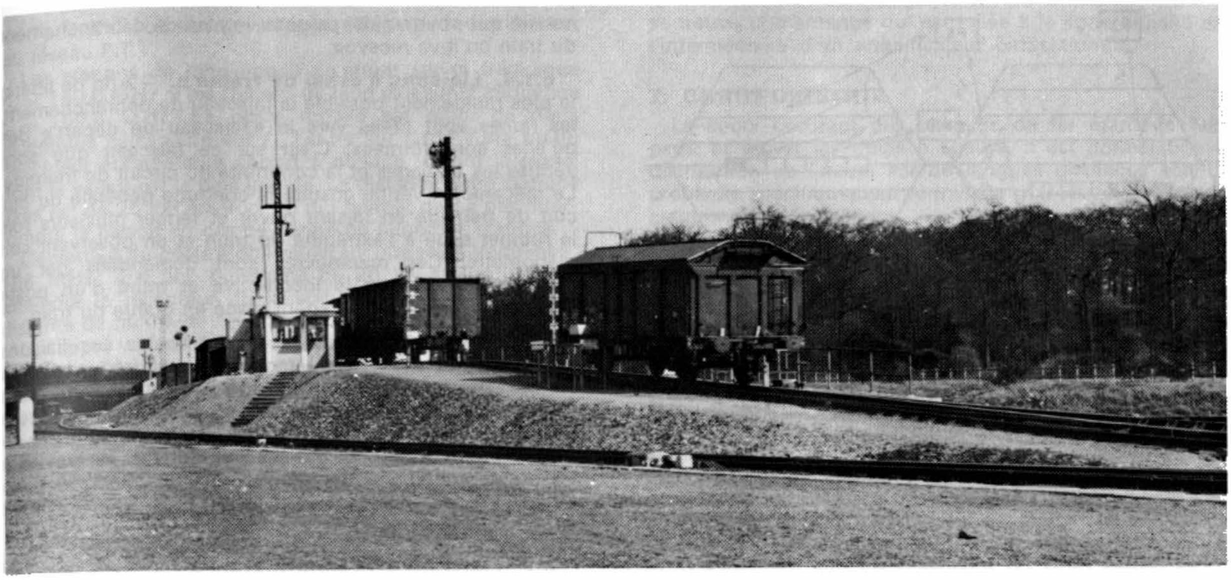


Fig. X-30 — Poste de bosse d'un triage (*S.N.C.F.*)

de wagons de destination identique. À l'extrémité de ce faisceau se trouve une bosse, point haut à partir duquel les wagons peuvent, par gravité, se placer sur l'une des voies du faisceau de débranchement (fig. X-30 et 31). Quand un train complet est formé, il est placé sur le faisceau de départ.

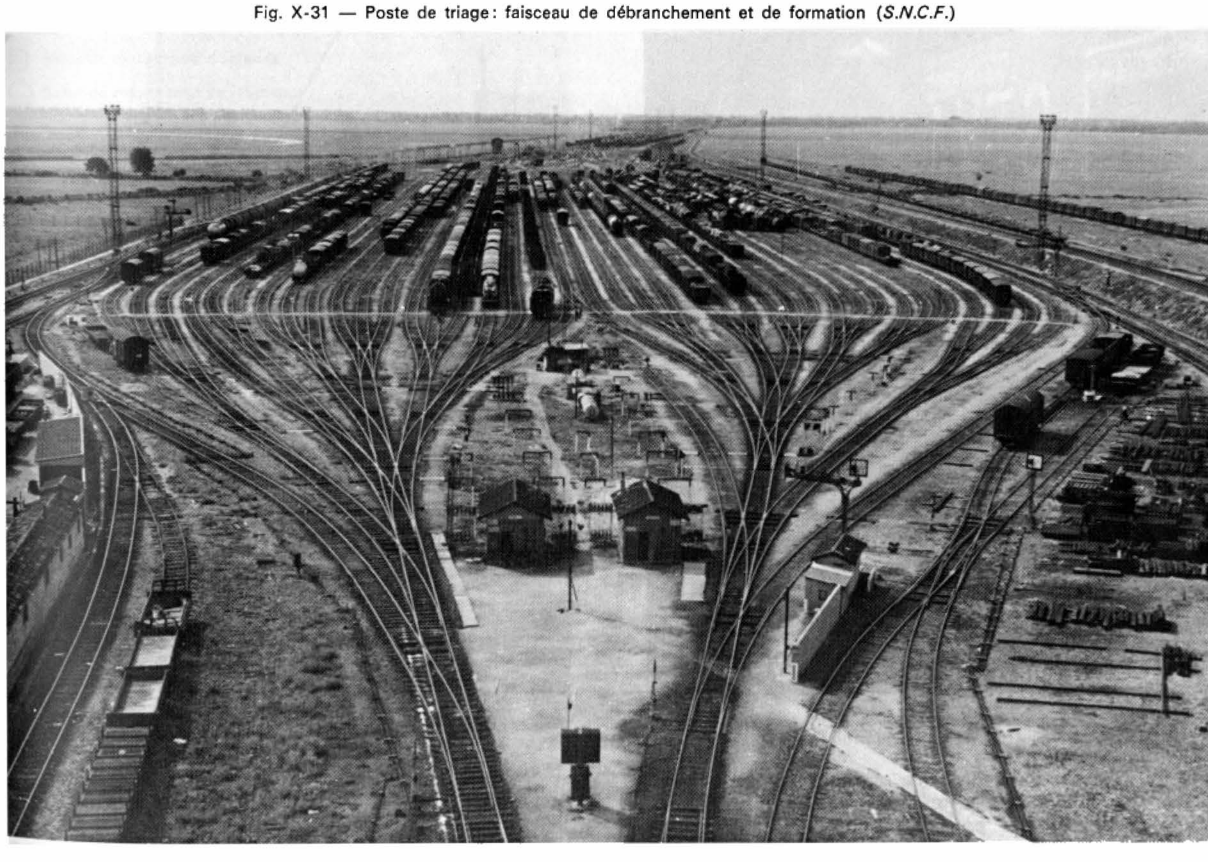
Les liaisons radio utilisées dans les triages sont les suivantes :

— liaisons « visiteurs » ;
— liaisons « bosse-machines » ;
— liaisons « pointeurs-releveurs » ;
— liaisons « essai de freins ».

6.1.1. Liaisons « visiteurs ». — Les rames à trier arrivent sur le faisceau d'arrivée où les wagons sont dételés suivant un plan de débranchement. Elles sont ensuite parcourues par des agents « visiteurs » qui signalent par radio au « chef des visiteurs » les anomalies qu'ils ont constatées sur les organes de roulement, de freinage, etc. Le chef des visiteurs prend alors les mesures qui s'imposent, par exemple, faire retirer de la rame les wagons douteux.

6.1.2. Liaisons « bosse - machines ». — Elles s'effectuent entre postes fixes (poste de bosse, poste d'aiguillage) et postes mobiles des locomotives de « pousse »

Fig. X-31 — Poste de triage : faisceau de débranchement et de formation (*S.N.C.F.*)



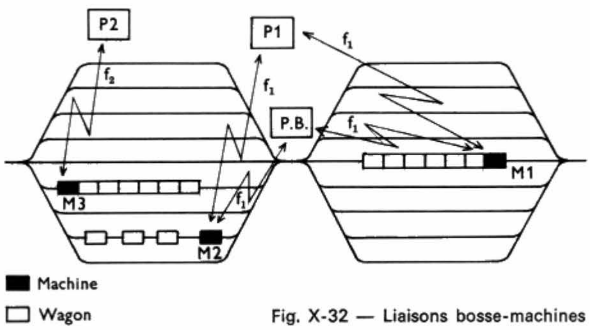


Fig. X-32 — Liaisons bosse-machines

ou de manœuvre. Sur la figure X-32 la machine de pousse M_1 refoule la rame à trier du faisceau d'arrivée vers la bosse ; elle est en liaison bilatérale à l'alternat avec le poste de bosse *PB* qui contrôle la manœuvre. Sur le faisceau de débranchement, la machine de manœuvre M_2 pousse les wagons pour les rapprocher les uns des autres dès qu'elle en a reçu l'ordre du poste P_1 ou du poste *PB*. La machine de manœuvre M_3 achemine les rames triées vers le faisceau de départ sur ordre du poste d'aiguillage P_2.

Les postes P_1 et *PB* travaillent sur une fréquence f_1, le poste P_2 sur une fréquence f_2 ; les machines M_1, M_2 et M_3 se calent par commutation sur f_1 ou f_2.

6.1.3. Liaisons « pointeurs - releveurs ». — Après triage, une rame formée sur le faisceau de débranchement doit être identifiée avant son départ. Un pointeur longe à pied la rame et transmet par radio au poste de commandement du triage (P.C.T.), pour chaque wagon, les renseignements suivants : nature et destination du chargement, tonnage, freinage, numéro d'immatriculation (fig. X-33).



Fig. X-33 — Pointeur-releveur transmettant au P.C.T. les renseignements concernant un wagon (*Thomson-C.S.F.*)

Au P.C.T. l'agent qui reçoit ces renseignements dactylographie en même temps sur une perforatrice un document paginé et une bande perforée ; celle-ci sera transmise ultérieurement sur le réseau télégraphique au triage destinataire qui pourra ainsi préparer le plan de débranchement du train qu'il va recevoir.

6.1.4. Liaisons « essai de freins ». — Afin de libérer le plus rapidement possible le faisceau de débranchement, les rames sont tirées vers le « faisceau de départ » dès qu'elles sont formées. C'est sur ce faisceau que sont vérifiés les attelages et la continuité du circuit de freinage. Le mécanicien vérifie ensuite la conduite générale du circuit de freinage en faisant ouvrir et fermer plusieurs fois le robinet situé à l'extrémité du train et en observant son manomètre. Ces manœuvres sont demandées par un agent placé près de la locomotive et muni d'un poste radio portatif à un autre agent placé en queue du train.

6.1.5. Matériel utilisé. — Pour toutes ces liaisons localisées, le matériel est à modulation de fréquence et à canaux préréglés. Les postes utilisés en portatif sont transistorisés et ont une puissance d'antenne inférieure à 1 W ; leur masse est d'environ 3 kg et leur autonomie de fonctionnement de 8 h. Sur les locomotives, les postes à tubes, de puissance d'antenne égale à 10 W ont été remplacés par des postes transistorisés, généralement de faible puissance.

6.2. Liaisons à grande distance. — Dans les pays dotés d'un réseau téléphonique étendu, les liaisons par radio à grande distance entre postes fixes présentent peu d'intérêt car elles doublent les liaisons téléphoniques. En revanche, pour les liaisons entre postes fixes et trains en marche l'utilisation de la radio est parfaitement justifiée.

6.2.1. Liaisons « train - réseau P.T.T. ». — La S.N.C.F. a installé en 1959 sur la ligne Paris-Lille une liaison vers le réseau P.T.T. à la disposition des voyageurs (fig. X-34). Les fréquences allouées par les P.T.T. se trouvant dans la bande des 160 MHz, il a fallu installer le long de la voie onze stations fixes connectées à un circuit téléphonique en câble dont l'origine est en gare



Fig. X-34 — Poste fixe radio pour la liaison de la ligne Paris-Lille (*S.N.C.F.*)

de Paris-Nord où se trouve l'appareillage de raccordement au réseau P.T.T.

Les stations de rang impair émettent sur la fréquence $f_1 = 160{,}6$ MHz et les stations de rang pair sur la fréquence $f_2 = 160{,}8$ MHz. Le poste mobile est muni de deux récepteurs calés; l'un sur f_1, l'autre sur f_2 de sorte qu'un basculeur automatique choisit à chaque instant le signal dont la valeur est la plus grande. La distance entre stations fixes est de 25 km environ, ce qui permet de ne pas interrompre la liaison en cas de panne de l'une des stations.

L'émetteur du poste mobile émet sur une seule fréquence: 156 MHz; il a une puissance de 20 W, suffisante pour atteindre le récepteur de la station fixe la plus proche, distante de moins de 13 km.

Un appel venant du réseau P.T.T. se traduit par le blocage de l'émetteur du poste mobile, l'allumage d'une lampe rouge et par l'appel local sur le train appelé, cela jusqu'au décrochage du combiné. Cette manœuvre provoque le déblocage de l'émetteur du mobile appelé. Le mobile non appelé reste bloqué et ne peut effectuer un appel à destination du réseau P.T.T. que si la lampe rouge est éteinte.

6.2.2. Liaisons « mécanicien-régulateur ». — Les chemins de fer japonais utilisent sur la ligne du Tokaïdo des liaisons radio à grande distance, notamment entre le mécanicien et le régulateur de l'exploitation.

Des postes fixes, disposés tous les 25 km environ, émettent respectivement sur des fréquences f_1, f_2, f_3, f_1, f_2, f_3, etc. (fig. X-35). Chaque poste émet simultanément la même fréquence vers l'amont et vers l'aval grâce à deux antennes directives. Les émetteurs fonctionnent en modulation de fréquence avec une puissance d'antenne de 40 W.

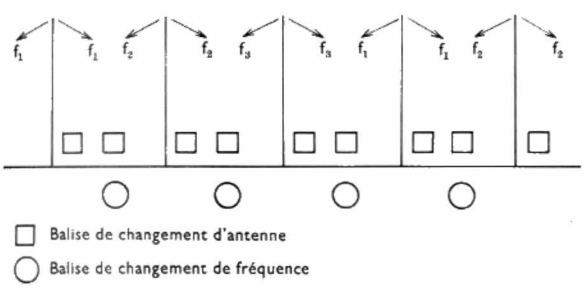


Fig. X-35 — Disposition des stations fixes sur la ligne du Tokaïdo

Les trains sont équipés d'un récepteur qui est commuté automatiquement sur la fréquence de l'émetteur fixe le plus proche lorsque le train passe sur une balise électromagnétique. Les antennes sont au nombre de deux, l'une orientée vers l'arrière du train, l'autre vers l'avant; le récepteur est commuté automatiquement par balise sur l'antenne orientée vers l'émetteur fixe le plus proche.

L'appel du mécanicien vers le régulateur se fait à la voix. Dans le sens régulateur-mécanicien, l'appel est sélectif: le régulateur compose au clavier le numéro du train, ce qui déclenche dans la cabine du train appelé un signal sonore et un signal lumineux; en décrochant son combiné le mécanicien bloque les postes des autres trains.

Dans les tunnels, les ondes radio sont guidées par une ligne bifilaire d'affaiblissement important (30 dB/km) qui exige une amplification tous les 500 m. À l'entrée du tunnel se trouve une antenne qui est reliée à la ligne bifilaire par l'intermédiaire d'un amplificateur bidirectionnel.

7. CHRONOMÉTRIE

Le souci constant des chemins de fer étant de faire partir et arriver les trains à l'heure, il est normal que la distribution de l'heure sur de longues distances soit un problème spécifiquement ferroviaire que les télécommunications ont dû résoudre.

7.1. Distribution de l'heure. — Des centres horaires situés dans les grandes gares sont chargés de cette distribution. Ils comprennent des horloges-mères qui, par l'intermédiaire de relais, envoient vers les horloges réceptrices des impulsions inversées toutes les demi-minutes ou toutes les secondes. Le circuit utilisé pour cette transmission est du type téléphonique à deux fils. Les horloges réceptrices sont toutes montées en série sur le circuit; elles sont shuntées pour obtenir l'intensité normale de fonctionnement. Le shunt permet, en outre, de retirer une horloge sans coupure du circuit.

Le nombre de réceptrices commandées par une horloge-mère est limité; si ce nombre limité est insuffisant, on prévoit un (ou plusieurs) autre circuit de distribution.

Certaines horloges réceptrices doivent recevoir des impulsions toutes les demi-secondes; ces impulsions sont émises par des relais pendulaires synchronisés par l'horloge-mère.

Un autre problème se pose, en plus de la distribution de l'heure, celui de la synchronisation.

7.2. Synchronisation de l'heure. — Les horloges-mères d'un centre horaire sont des horloges électromagnétiques à balancier pendulaire à mouvement auto-entretenu. Elles sont synchronisées à partir d'une horloge de plus grande précision dite « garde-temps ». Celle-ci est corrigée automatiquement par des impulsions reçues par radio. Le garde-temps émet des impulsions de synchronisation sur un circuit qui relie toutes les horloges-mères; les impulsions n'agissent sur une horloge que s'il y a un écart avec le garde-temps.

8. CONCLUSION

Le problème posé par les télécommunications du chemin de fer n'est en rien comparable à celui de l'administration des P.T.T. Celle-ci doit faire face à des tâches bien précises: développement et entretien des réseaux téléphoniques et télégraphiques, ainsi que des circuits utilisés par les particuliers pour les transmissions de données vers des ordinateurs privés.

Le chemin de fer est un des rares organismes autorisé par les P.T.T., moyennant une redevance annuelle, à posséder son propre réseau; il se trouve donc placé devant des problèmes qui, s'ils sont loin d'avoir l'importance quantitative de ceux des P.T.T., sont, en revanche, de nature très diverse: en plus des réseaux téléphoniques et télégraphiques dont la structure doit être adaptée au réseau ferroviaire, il doit étudier des circuits de téléphonie sélective, un réseau de transmission de données, des liaisons radio entre poste fixe et poste mobile, etc. Faisant ainsi appel à des techniques plus variées, il impose aux personnes chargées d'étudier et de mettre en œuvre les installations, des connaissances développées dans tous les domaines des télécommunications, ce qui rend leur métier plus passionnant.

CHAPITRE XI

AUTOMATISATION DE LA MARCHE DES TRAINS

Le chemin de fer, par son principe même, se prête évidemment bien à des opérations d'automatisation. En effet, l'exécution du transport par fer sur un réseau important comporte d'abord la préparation des itinéraires que doivent emprunter les différents trains et ensuite la circulation de ceux-ci qui doit se faire dans des conditions absolues de sécurité. Cela impose le respect des horaires et des signaux assurant l'espacement des convois et la protection des nœuds ferroviaires. Les opérations concernant la préparation des itinéraires sont déjà largement automatisées et les postes d'aiguillages modernes permettent de mettre en œuvre, d'une façon simple pour le personnel, la puissance nécessaire à la manœuvre des aiguillages établissant l'itinéraire désiré (dans la zone du poste) en évitant, par des enclenchements appropriés, l'établissement d'itinéraires incompatibles entre eux.

En ce qui concerne la marche proprement dite des trains, qui comporte essentiellement les opérations de conduite de l'engin moteur et le respect des indications données par les signaux, on peut dire que l'automatisation a été moins développée que dans le cas précédent mais elle est actuellement en plein essor.

Dans ce qui va suivre, nous nous proposons de traiter en premier lieu cette question.

L'exploitation automatique d'un réseau, c'est-à-dire, en fait, la régulation du trafic des trains, de façon optimale, est une question beaucoup plus complexe. Du reste elle peut être traitée, tout au moins sur le plan théorique, indépendamment de la précédente, encore que les deux questions présentent fréquemment des points de contact et des interactions.

Bien que ce ne soit pas là notre sujet, nous en dirons ensuite quelques mots.

1. AUTOMATISATION DE LA CONDUITE

Automatiser la conduite revient au principal à doter la locomotive de dispositifs qui, en se substituant à l'action manuelle du conducteur, règlent d'eux-mêmes la puissance développée afin que le train circule à une vitesse déterminée, tout en respectant les contraintes de sécurité.

En conduite traditionnelle, ces contraintes sont transmises par les dispositifs de signalisation qui prescrivent aux conducteurs de régler la marche de façon telle qu'ils soient toujours à même de respecter les arrêts ou les limitations de vitesse imposées. L'observation des signaux, élément fondamental en matière de sécurité, est complétée par les dispositifs de *répétition* ayant pour rôle de confirmer aux conducteurs, par des indications sonores ou lumineuses en cabine, l'aspect des signaux franchis. La répétition des signaux est du type ponctuel s'il est fait usage de balises implantées localement ou du type linéaire lorsque les informations sont transmises aux locomotives par injection de courants caractéristiques dans les circuits de voie.

De plus, la répétition des signaux peut être elle-même complétée par des dispositifs de « contrôle de la marche des trains » qui, tout en laissant aux conducteurs la faculté de régler la vitesse de leurs trains, concourent au renforcement de la sécurité en provoquant automatiquement l'arrêt du convoi s'il advient qu'à un instant déterminé cette vitesse devienne excessive.

1.1. Intérêt de l'automatisation des opérations de conduite. — Automatiser les opérations de conduite est intéressant à divers points de vue :

— Sur le plan humain, en raison même des perfectionnements techniques apportés aux engins de traction, leur conduite devient de plus en plus délicate et astreignante. Le nombre de paramètres que le conducteur doit prendre simultanément en considération, tout en respectant l'horaire, ne cesse de croître et cela alourdit notablement sa tâche.

— Sur le plan de la sécurité l'accroissement des performances, notamment de la vitesse, impose l'adoption de règles de plus en plus strictes pour maintenir le haut niveau de sécurité du chemin de fer. Des automatismes logiques, disponibles en permanence et exécutant avec plus de rapidité et de sûreté des tâches qui étaient traditionnellement confiées aux conducteurs, apportent leur concours dans ce domaine.

— Sur le plan de la qualité du service et de l'exploitation en général, l'intérêt des automatismes de conduite se manifeste, entre autres, par le fait qu'ils permettent un meilleur respect des horaires et qu'ils améliorent la précision de la conduite, notamment pour l'exécution des arrêts de service dans les gares.

— Sur le plan de l'augmentation de la capacité des lignes, problème qui se pose souvent sur les artères déjà chargées, les automatismes peuvent être utilisés selon deux formules distinctes :

- Soit en optimalisant les marches, c'est-à-dire en faisant en sorte qu'elles soient réalisées dans le minimum de temps, ce qui permet d'augmenter la cadence des trains. C'est une solution intéressante pour améliorer la desserte des banlieues denses.
- Soit en augmentant les vitesses et les charges, ce qui nécessite un accroissement de l'effort de traction disponible, condition pouvant être satisfaite, par exemple, en insérant plusieurs locomotives dans un même train et en synchronisant leurs actions. C'est une solution qui convient pour les réseaux de grande traction.

L'aspect économique résultant de l'introduction d'automatismes ne saurait être négligé. Difficile à évaluer pour les deux premiers points évoqués (la suppression de l'agent de conduite n'est pas envisagée et le bénéfice que peut apporter un appareillage en matière de sécurité relève surtout des probabilités), il peut en revanche être parfaitement abordé par des études théoriques et estimé de façon précise en ce qui concerne les deux derniers points.

1.2. Étapes de développement. — L'automatisation de la conduite, qui est appelée à se développer par étapes successives, fait déjà l'objet de multiples réalisations partielles parmi lesquelles peuvent être cités :

— La *marche à vitesse imposée.* — Dans ce cas, la locomotive est munie d'un dispositif d'asservissement en vitesse tel que, pour le mécanicien, la conduite se limite au simple affichage, sur un cadran gradué, de la vitesse qu'il désire réaliser. Un tel appareillage évite les manœuvres systématiques et astreignantes de réglage continuel de l'effort de traction et laisse au conducteur davantage de liberté et de temps pour concentrer son attention à l'observation des signaux et à la surveillance générale du bon fonctionnement des organes de la locomotive.

— *L'arrêt au but.* — Un dispositif assiste le conducteur dans l'une des plus délicates de ses tâches, à savoir l'arrêt précis et rapide d'un train en un point prédéterminé dans les gares de banlieue. Cette opération est en effet délicate car elle met en œuvre des phénomènes de freinage présentant des temps de réponse longs et de multiples non-linéarités, paramètres qui sont toujours difficiles à maîtriser dans un système régulateur.

— La *marche à vitesse programmée* avec respect de l'horaire et consommation minimale d'énergie. — Sur les lignes de banlieue à fort trafic, il est impératif, pour assurer un débit maximal et régulier, de conserver les intervalles de temps prescrits entre les trains en respectant les horaires avec précision non seulement en gare mais également en ligne. L'une des solutions possibles consiste à introduire à bord des automotrices un programme de marche prédéterminé qui contient toutes les consignes d'horaires, d'accélération, de vitesse et de freinage. Ce programme, qui pilote un système d'asservissement agissant sur les appareillages des automotrices, est en outre complété par un dispositif logique agissant de telle sorte que le respect de l'horaire et le rattrapage des retards éventuels se fassent au prix d'une consommation minimale d'énergie.

2. DESCRIPTION D'APPAREILLAGES DE CONDUITE AUTOMATIQUE DES TRAINS

2.1. Marche à vitesse imposée. — Le principe du dispositif (fig. XI-1) est utilisé très couramment dans les problèmes de régulation de vitesse. Il consiste simplement à comparer un signal traduisant la vitesse réelle de la locomotive et un signal de référence caractérisant la vitesse théorique ou de consigne à laquelle on désire l'asservir.

De cette comparaison, on déduit un signal d'erreur, fonction de l'écart ΔV entre les deux vitesses, qui, selon son signe, positif ou négatif, agit sur l'équipement de la locomotive pour augmenter ou réduire l'effort de traction et, éventuellement, appliquer le freinage.

Très simple dans son principe, la réalisation de l'appareillage est en fait rendue assez complexe pour deux raisons :

— Sur les locomotives alimentées en courant continu, le réglage de l'effort de traction se fait par action sur le rhéostat, par changement de couplage des moteurs et par affaiblissement du champ des inducteurs. Ces réglages sont discontinus et il n'est pas souhaitable de demeurer longtemps sur les crans rhéostatiques. En traction sous caténaires monophasées 50 Hz, le réglage se fait également cran par cran en prélevant, grâce au graduateur du transformateur principal de la locomotive, une tension variable pour l'alimentation des moteurs de traction.

— Le passage d'un cran au suivant, ou de l'état de traction à l'état de freinage et réciproquement, ou l'application du freinage pneumatique exigent des temps relativement longs.

Il en résulte que pour obtenir une bonne précision et éviter des instabilités de vitesse autour de la vitesse de consigne, il est nécessaire d'anticiper les phénomènes et d'introduire en particulier des contre-réactions à caractère accélérométrique lorsque l'écart de vitesse ΔV devient faible.

De plus, les ordres d'augmentation de l'effort de traction ne doivent pas entraîner un dépassement des courants limites tolérés par les moteurs, il convient donc de les contrôler.

Les régulateurs utilisés, entièrement électroniques, associent des équipements logiques et analogiques qui ne diffèrent entre eux que par les circuits de sortie adaptés aux organes de commande des locomotives selon leurs types. L'ensemble de l'appareillage de commande comprend :

— Un manipulateur qui est soit un variomètre (autotransformateur à rapport de transformation variable), soit un potentiomètre (fig. XI-2) délivrant une tension alternative à 50 Hz ou continue proportionnelle à la vitesse désirée.

— Un tachymètre constitué d'un capteur électromagnétique (fig. XI-3) monté sur le carter d'engrenage d'un pignon d'entraînement des roues et qui fournit un courant dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse réelle de la locomotive.

— Un dispositif de contrôle de l'intensité du courant traction.

— Le régulateur électronique (fig. XI-4) comprenant un tiroir d'alimentation, un tiroir de mesure des vitesses,

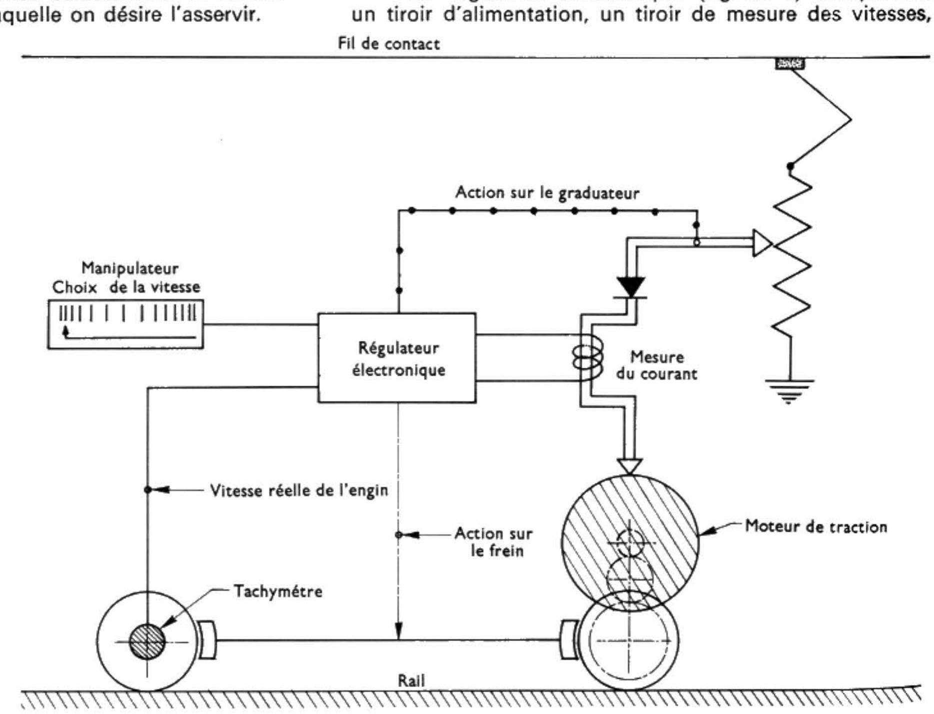


Fig. XI-1

Marche à vitesse imposée : schéma synoptique de l'appareillage

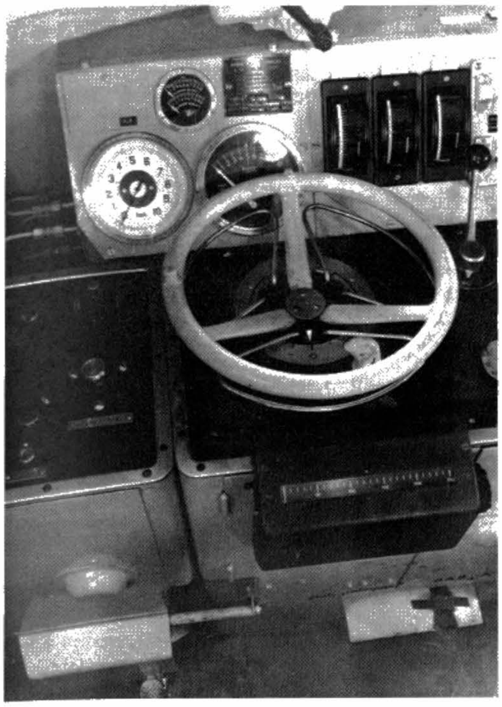
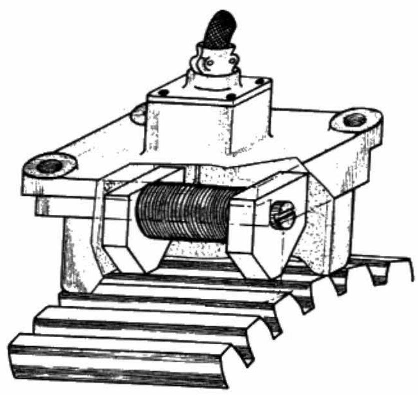


Fig. XI-2 — Marche à vitesse imposée : pupitre de conduite ; le manipulateur d'affichage de vitesse (échelle graduée linéaire) est situé sous le volant de conduite manuelle (*S.N.C.F.*)

Fig. XI-3

Capteur électro-magnétique



Au premier plan une bobine ; elle embrasse un flux magnétique qui passe par un maximum lorsqu'une dent de l'engrenage passe en regard de la tête magnétique, faisant naître une tension dans le circuit électrique

écarts de vitesse, accélérations et décélérations ; un tiroir émetteur pour fournir les ordres de progression-régression, un tiroir récepteur qui adapte ces ordres pour la commande des circuits de l'engin moteur.

Ce type d'appareillage est intéressant en raison de son caractère universel et par le fait qu'il est un élément de base de l'automatisation de la marche des trains.

2.2. Arrêt au but. — L'exécution d'un arrêt en un point prédéterminé d'une gare doit concilier à la fois des conditions de précision, de rapidité et de confort pour les voyageurs, et également satisfaire à des impératifs de sécurité lorsque ce point se situe, par exemple, aux abords immédiats d'un signal d'arrêt. La précision requise est en effet très grande puisqu'au terme d'un freinage réparti sur environ 1000 m, l'erreur admissible sur l'imprécision de l'arrêt ne doit pas excéder un mètre.

La plus grande rapidité d'arrêt serait obtenue en utilisant au maximum les possibilités de freinage du train, mais cette formule conduirait à des dispersions incompatibles avec la précision et à des conditions inadmissibles de confort. Une certaine durée d'arrêt doit donc être tolérée, cela au détriment de la rapidité d'exécution mais à l'avantage du confort et de la sécurité. De plus, le conducteur a ainsi une

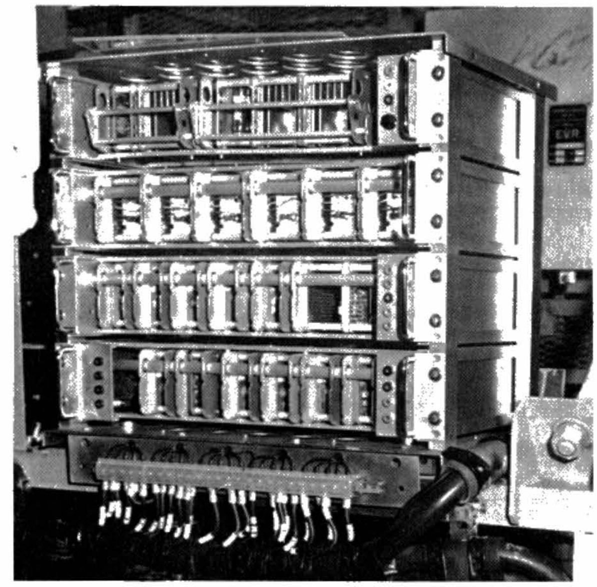


Fig. XI-4 — Marche à vitesse imposée : appareillage de régulation électronique (*S.N.C.F.*)

possibilité de reprise en main de la commande des freins dans l'hypothèse d'une défaillance de l'appareillage.

Pour la réalisation de tels dispositifs, divers principes peuvent être mis en œuvre. L'un d'entre eux consiste à asservir, à l'approche d'une station, le mouvement du train à une loi de décélération imposée par une courbe « vitesse-espace » plus ou moins matérialisée et couramment désignée sous le nom de *parabole de freinage*, laquelle, en chaque point du parcours de freinage, définit une vitesse de consigne à respecter.

Cette courbe peut être matérialisée par exemple :

— au sol, par des courants codés émis localement dans une suite de circuits de voie élémentaires qui définissent ainsi des réductions de vitesse par paliers discontinus successifs ;

— sur l'engin moteur, par des générateurs de fonction traduisant sous forme électrique la parabole de freinage et dont la mise en action est déclenchée par une balise (fig. XI-5) qui est implantée en voie en amont de la gare et qui définit l'origine du processus de freinage.

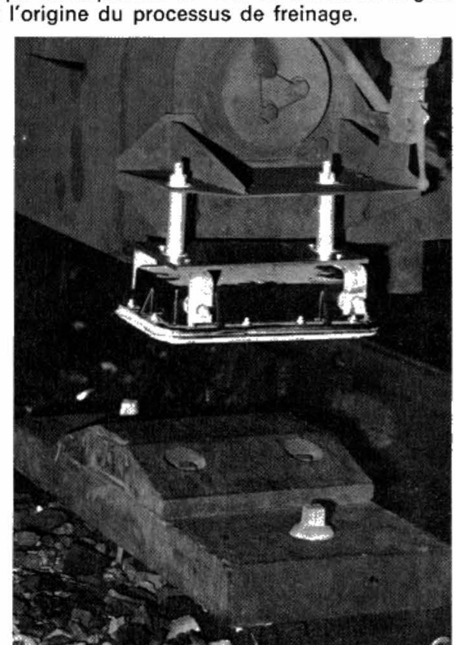


Fig. XI-5 — Arrêt au but : balise magnétique en voie et capteur associé monté sur l'automotrice (*S.N.C.F.*)

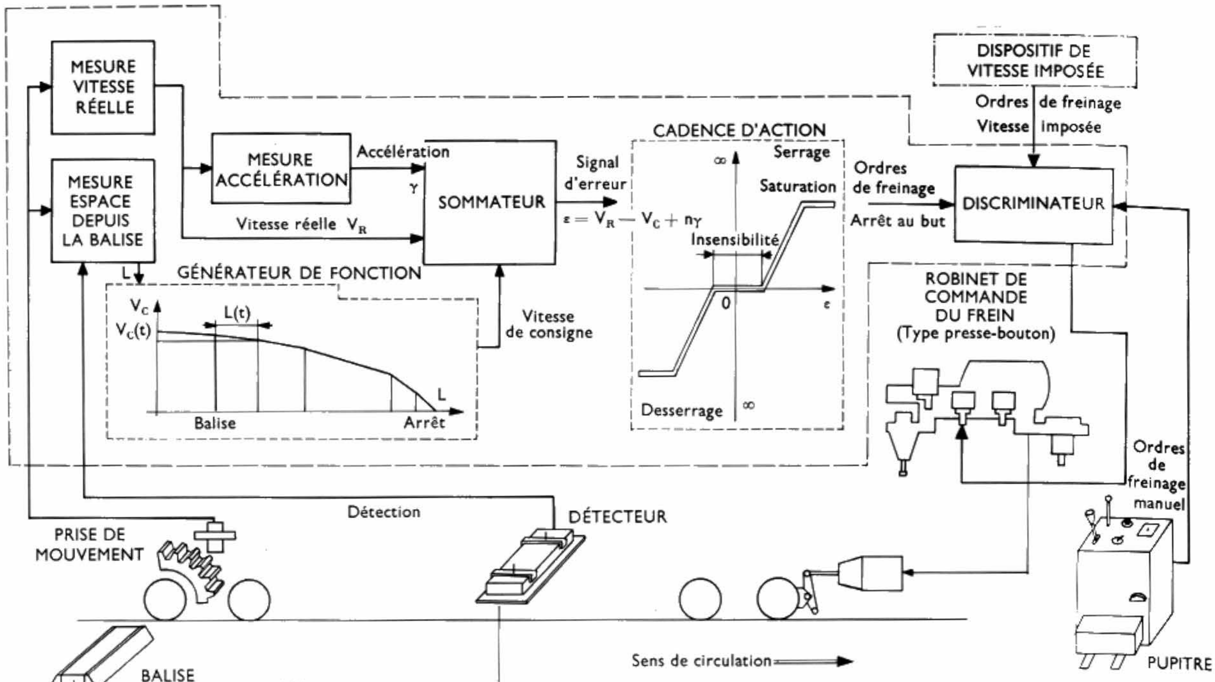


Fig. XI-6 — Arrêt au but : schéma de principe du dispositif et de ses liaisons avec les organes de mesure et de commande

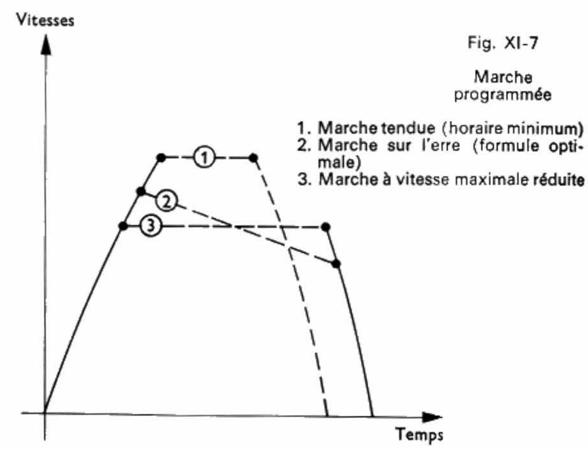


Fig. XI-7

Marche programmée

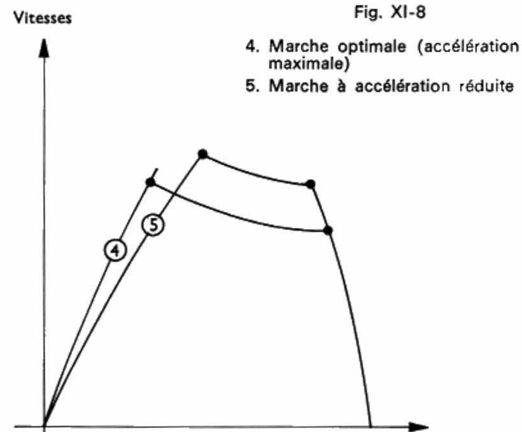


Fig. XI-8

L'asservissement de la locomotive (fig. XI-6) fait appel à une technique analogue à celle des systèmes de vitesse imposée : en permanence, la grandeur « vitesse de consigne » définie par la parabole de freinage est comparée à la vitesse réelle du train. Celle-ci est connue en utilisant un capteur magnétique dont les impulsions permettent, par ailleurs, de déterminer par comptage les espaces parcourus depuis le franchissement de la balise et de piloter ainsi le générateur de fonction.

Un signal correspondant à la vitesse réelle et un signal fonction de l'accélération sont ajoutés algébriquement à la vitesse de consigne dans l'asservissement pour élaborer un signal d'erreur ε. De ce signal dépend le freinage (frein presse-bouton) :

— si ε est faible, aucune action n'est exercée ;

— si ε atteint une valeur de saturation, selon son signe, le freinage est maximal ou le desserrage est total ;

— si ε est compris entre ces deux valeurs, l'action de freinage est modulée.

2.3. Automotrices à marche programmée. — La présence d'appareillage de marche programmée à bord des automotrices de banlieue vise non seulement à simplifier la tâche du conducteur, en limitant son rôle à la seule observation des signaux mais à améliorer les conditions d'exploitation par une conduite rationnelle.

Par « conduite rationnelle », on entend que le programme de marche doit être tel que la consommation d'énergie soit minimale. Cette notion de consommation minimale est difficile à percevoir même pour un agent de conduite averti et la conduite dans ces conditions nécessite l'emploi d'automatismes perfectionnés.

En effet, si le temps alloué pour aller d'une gare à la suivante était égal au temps minimal permis par les caractéristiques de l'engin moteur et de la ligne, les automatismes seraient très simples à concevoir, les séquences de marche se résumant alors à une accélération maximale, suivie d'une circulation à vitesse limite et d'un freinage d'urgence.

En fait, une certaine détente est introduite dans l'horaire (5 à 10 %), afin de donner de la souplesse à l'exploitation. Conduire rationnellement consiste alors à déterminer les conditions optimales dans lesquelles cette marge de temps sera absorbée et, en cas de retard, comment devra être réduit le temps à perdre.

La théorie montre (fig. XI-7) que la façon la plus économique d'opérer consiste à consommer cette marge au cours des marches sur l'erre (courbe 2) et non par une réduction uniforme de la vitesse maximale (courbe 3). Elle montre aussi (fig. XI-8) qu'à vitesses moyennes égales, il n'est pas intéressant de réduire les accélérations ou décélérations et qu'une marche du type 4 est plus avantageuse qu'une marche du type 5.

L'appareillage de marche programmée optimalisée satisfait à ces principes et assure également une répartition optimale des marges de temps sur les différentes séquences du parcours entre gares successives.

Pour réaliser ces fonctions, l'appareillage (fig. XI-9) se compose essentiellement :

— d'un tiroir d'alimentation ;

— d'un tiroir « espace » comprenant un dérouleur à bande perforée sur laquelle sont programmées les consignes d'accélération, de vitesse limite et de freinage ;

— d'un tiroir « temps », comprenant un deuxième dérouleur à bande perforée sur laquelle sont consignés les points de transition entre les périodes d'accélération et de marche sur l'erre ;

— d'un tiroir logique comportant une horloge électronique et des dispositifs logiques commandant le fonctionnement des dérouleurs et émettant les ordres de marche correspondants ;

— d'un dispositif de mesure d'espace et de vitesse piloté par un capteur magnétique placé à l'extrémité d'un engrenage de traction.

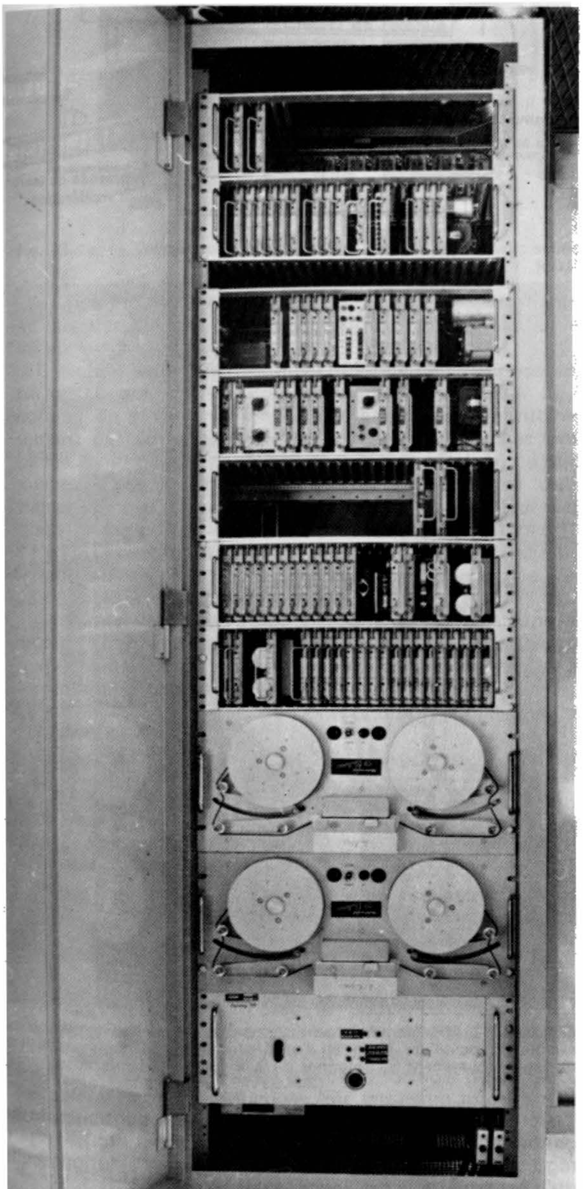


Fig. XI-9 — Automotrice à marche programmée : appareillage à bord comprenant de haut en bas, l'alimentation, les tiroirs « espaces » et « temps », les circuits logiques (*S.N.C.F.*)

À la gare origine, le conducteur affiche manuellement l'heure d'arrivée à la gare terminus et, au moment du départ, appuie sur un bouton de mise en route de l'appareillage. Dès réception de ce signal, l'automatisme calcule le temps restant pour atteindre ce point et choisit alors sur la bande « temps » programmée, l'instant où la marche sur l'erre devra être déclenchée, la bande « espace » contrôlant pour sa part l'accélération, la vitesse limite, le freinage. Au départ de chaque gare intermédiaire, le calculateur exécute les mêmes opérations à partir des nouvelles données de temps et d'espace.

Plusieurs programmes, fonction du type de train, peuvent être enregistrés sur bandes. La sélection est faite par le conducteur au moyen d'un codage à deux chiffres sur cadran téléphonique.

L'arrêt des trains en gare est contrôlé par le dispositif d'arrêt au but décrit précédemment. Pour éviter que les trains directs ne s'arrêtent intempestivement dans les gares intermédiaires, l'action de la balise de déclenchement du processus d'arrêt n'est transmise à l'équipement que sur autorisation de la bande « espace » sélectionnée par le conducteur.

2.4. Télécommande des locomotives de manœuvre. La télécommande des locomotives de manœuvre dans les gares de triage constitue une réalisation très complète d'automatisme car elle conjugue une commande à distance par radio et un asservissement de vitesse.

Le but recherché dans cette application est de régler à distance et d'une manière très précise ($\pm$ 200 m/h) la vitesse de refoulement des rames en cours de débranchement, afin que la cadence des wagons ou groupe de wagons descendant par gravité du sommet de la butte vers les freins de voie et les faisceaux de tri se fasse dans les meilleures conditions, c'est-à-dire dans le minimum de temps et avec le maximum de sécurité.

Cette commande à distance est réalisée par voie hertzienne et l'agent situé au sommet de la butte, qui a une vue d'ensemble des mouvements de wagons en cours, dispose à cet effet d'un pupitre de commande associé à un transmetteur d'ordres qui pilote un émetteur à 440 MHz.

L'information de vitesse est traduite en modulant en fréquence l'onde porteuse par un signal sinusoïdal basse fréquence, voisine de 2 000 Hz, sous-porteuse elle-même périodiquement interrompue par une tension de forme rectangulaire à la fréquence de 10 Hz (V. fig. XI-10).

La grandeur « vitesse » apparaît finalement sous la forme d'un rapport entre le temps T_1 pendant lequel cette tension est positive et le temps T de la période. Elle est donc traduite par un nombre pur qui caractérise ce rapport cyclique ; elle est ainsi bien protégée contre les fluctuations de la transmission hertzienne.

Le pupitre du transmetteur d'ordres comporte une série de touches correspondant à des taux de vitesse de refoulement prédéterminés (V. fig. XI-11) que le préposé à la butte enfonce sélectivement en fonction de la vitesse désirée.

Les locomotives utilisées, du type Diesel électrique (V. fig. XI-12), comportent essentiellement :

— un récepteur qui recueille le signal radio et après détection le transfère dans un décodeur intégrateur lequel délivre en sortie une tension caractérisant la vitesse télécommandée ;

— un comparateur qui permet de déterminer l'écart entre la vitesse théorique et la vitesse réelle, cette dernière étant mesurée par un organe tachymétrique, dynamo ou alternateur, entraîné par l'un des essieux de la locomotive ;

— l'asservissement proprement dit qui, à partir de l'écart entre ces deux grandeurs et après amplification et correction par des contre-réactions accélérométriques, agit sur un servomécanisme pneumatique lequel commande à son tour les organes d'accélération ou de freinage de la locomotive.

La figure XI-13 montre schématiquement l'ensemble des organes pneumatiques et leurs interconnexions qui, en position « télécommande », se substituent automatiquement aux dispositifs de commande manuelle.

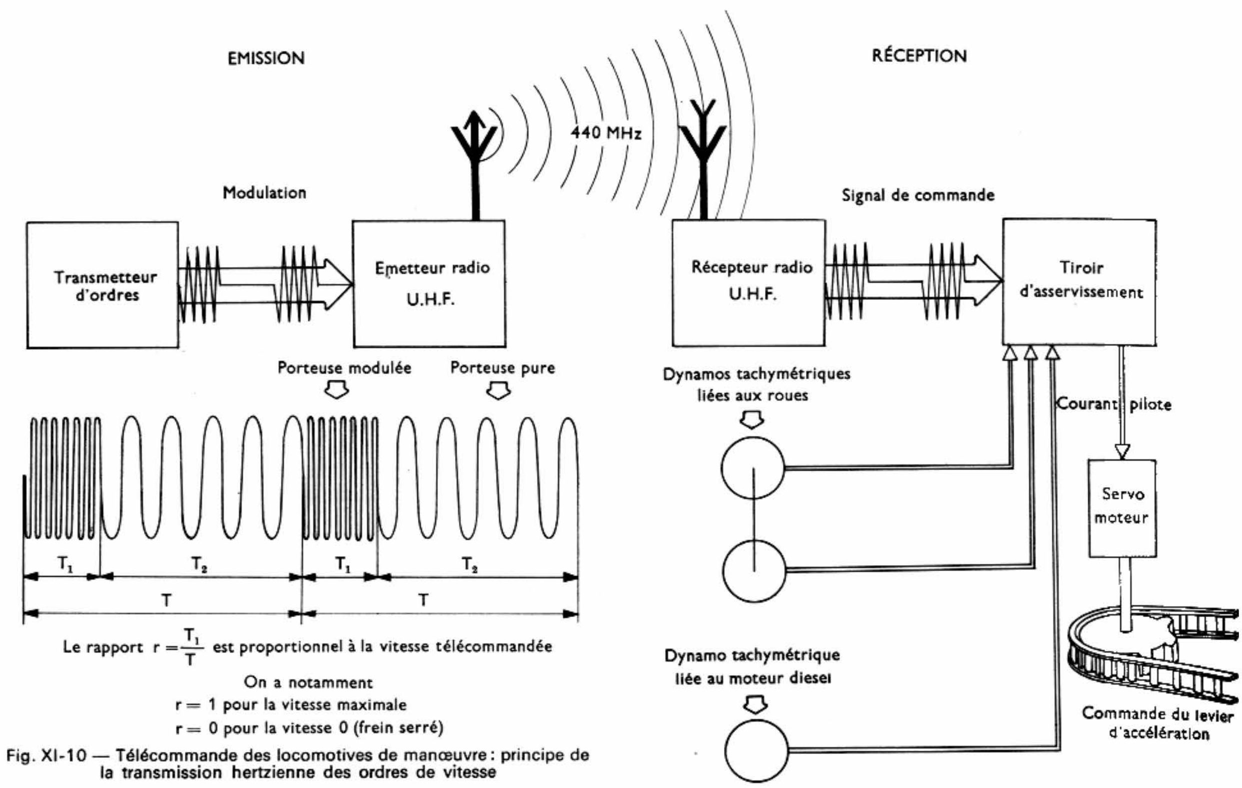


Fig. XI-10 — Télécommande des locomotives de manœuvre : principe de la transmission hertzienne des ordres de vitesse

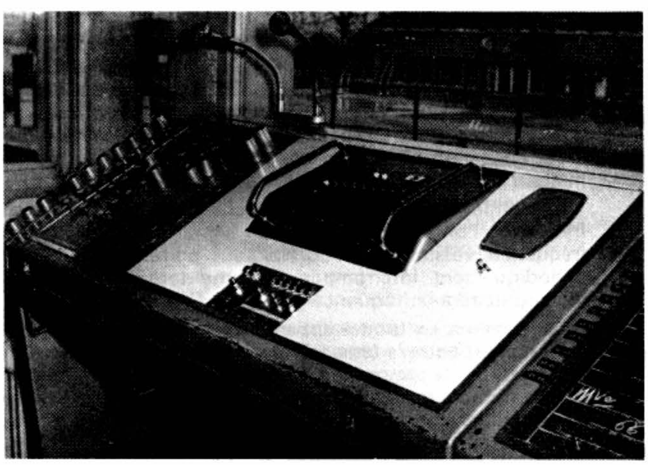


Fig. XI-11 — Télécommande des locomotives de manœuvres : le pupitre de commande situé au poste de butte apparaît en noir au centre de la photographie (*S.N.C.F.*)

Des équipements complémentaires permettent de télécommander sélectivement deux ou plusieurs locomotives, notamment dans le cas où deux engins moteurs sont utilisés alternativement pour refouler les rames à la butte dans les grands triages.

Dans une phase ultime d'automatisation qui s'inscrit dans le cadre général de l'automatisation des triages, le plan de débranchement sera programmé dans ses moindres détails, réglant ainsi, par une commande conjointe de la locomotive, des freins de voie et des itinéraires vers les faisceaux de voies, l'une des séquences fondamentales intervenant dans la formation des trains au départ de ces établissements.

3. RÉGULATION AUTOMATIQUE DU TRAFIC

Pour régler les mouvements d'un ensemble de trains circulant sur un réseau maillé à partir d'un centre de régulation, il est impératif que ce centre connaisse à tout instant la position et les conditions de circulation de chaque train. Cela suppose la mise en place d'organes de localisation d'identification et de systèmes de transmission d'informations fiables.



Fig. XI-12 — Télécommande des locomotives de manœuvre : vue d'ensemble du poste de butte et d'une locomotive télécommandée (on distingue notamment les antennes de radiocommande et de radiophonie) (*S.N.C.F.*)

Après analyse de ces paramètres et en tenant compte de contingences diverses (ordre de priorité, etc.), l'agent régulateur peut alors choisir entre diverses solutions celle qu'il estime être la meilleure et décider :

— de l'ordre de succession à adopter pour obtenir un écoulement optimal des rames aux abords des bifurcations, par exemple ;

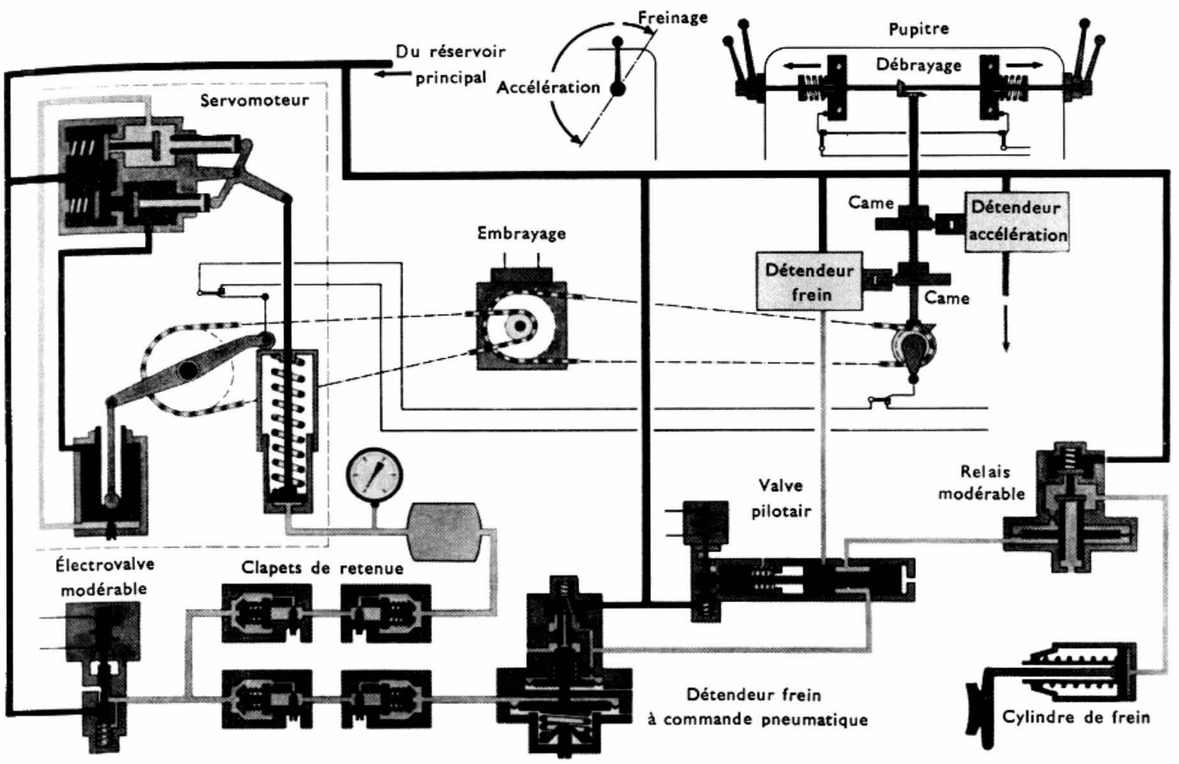


Fig. X.-13 — Télécommande des locomotives de manœuvre: schéma de principe des organes pneumatiques de commande et d'asservissement des locomotives (*S.N.C.F.*)

— des modifications à apporter en cas de perturbation au programme de circulation originel pour fluidifier au mieux le trafic.

Ces choix étant faits, il convient enfin de les imposer aux trains, ce qui, entre autres problèmes, pose celui de la commande et de la formation des itinéraires (soit indirectement par l'intermédiaire des postes d'aiguillages ordinaires, soit directement à partir du poste de régulation même: c'est la commande centralisée) et celui de la transmission d'informations vers les trains pour leur indiquer les conditions de marche à respecter, notamment la vitesse. Des signaux latéraux, une liaison directe (telle que la radio) entre poste de régulation et locomotive, peuvent être utilisés à cet effet.

Le dernier stade de l'automatisme réside dans la suppression de l'intervention humaine au niveau du poste de commandement. Dans cette formule, un ordinateur recevant les informations collectées en ligne, analyse la situation sur l'ensemble du réseau et choisit la solution optimale aux lieu et place de l'opérateur.

Cette phase ultime de cybernétique suppose un dialogue quasi permanent entre postes de régulation et mobiles et requiert des moyens de transmission très puissants compte tenu du volume considérable d'informations à écouler bilatéralement entre trains et ordinateurs.

Sans entrer dans le détail des moyens de transmission utilisés à cet effet, et qui demeurent encore au stade expérimental, mentionnons les systèmes faisant appel à un conducteur auxiliaire en voie réalisé au moyen de deux câbles parallèles disposés entre les rails et périodiquement croisés (fig. XI-14). Les boucles ainsi constituées permettent l'écoulement de messages codés redondants, type *multiplex temps*, dans les deux sens de transmission et à des vitesses de plusieurs centaines de bauds.

La haute capacité offerte par cette formule ouvre incontestablement des perspectives très larges en matière d'automatisme et de cybernétique ferroviaires.

4. CONCLUSION

L'exposé qui précède fait bien ressortir le caractère inéluctable et irréversible de l'évolution vers l'automatisation (au sens le plus large du terme) de l'industrie ferroviaire.



Fig. XI-14 — Transmission bilatérale d'informations entre voie et locomotive; conducteur auxiliaire posé en lignes (*S.N.C.F.*)

Les progrès rapides de l'élèctronique sont de nature à accélérer cette évolution, dans laquelle toutes les grandes administrations de chemin de fer sont engagées. Elles en attendent, à juste titre, un accroissement de la sécurité du transport et de la rentabilité de celui-ci, objectifs qui se trouvent plus que jamais au premier plan de leurs préoccupations.

CHAPITRE XII

CHEMINS DE FER URBAINS OU MÉTROPOLITAINS

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Définitions. — Un chemin de fer urbain ou métropolitain est un chemin de fer à emprise séparée — en souterrain, sur viaduc, ou au sol — assurant le transport massif des voyageurs à l'intérieur d'une agglomération ou région urbaine.

Cette définition succincte doit être complétée par plusieurs caractéristiques touchant le tracé et l'exploitation :

— Un réseau métropolitain pénètre dans les quartiers centraux généralement en souterrain, par plusieurs lignes qui se coupent et qui comportent chacune plusieurs stations implantées dans ces quartiers, permettant ainsi, par le jeu des correspondances, des liaisons intérieures multiples, faciles et rapides.

— Les trains d'un métropolitain, à traction électrique et motrices multiples, se succèdent à des intervalles très réduits (pouvant s'abaisser à moins de 90 s).

— Les quais des stations ont un niveau voisin du plancher des voitures pour permettre des échanges rapides de voyageurs et des temps de stationnement faibles.

Ces caractéristiques distinguent nettement les métropolitains des lignes ferroviaires de banlieue d'une part et des tramways à emprise séparée — éventuellement souterrains — d'autre part.

Un réseau métropolitain peut présenter différentes physionomies :

— Il est strictement *urbain* lorsqu'il est établi à l'intérieur d'une agglomération urbaine continue, à peuplement très dense ; les stations sont alors distantes en moyenne de 500 à 800 m (fig. XII-1).



Fig. XII-1 — Métro urbain ; ligne à roulement sur pneumatiques à Paris (*R.A.T.P.*)



Fig. XII-2 — Métro régional; Paris, station Charles de Gaulle-Étoile (*R.A.T.P.*)

— Il a un caractère *régional* lorsqu'il comporte des branches desservant des localités périphériques distinctes de l'agglomération centrale; sur ces branches, les stations sont distantes de 1 000 à 2 000 m (fig. XII-2).

Certains réseaux ont le double caractère urbain et régional et comportent des sections de lignes correspondant à l'une ou l'autre de ces deux définitions.

Les chemins de fer urbains constituent le plus souvent des réseaux entièrement indépendants des chemins de fer interurbains; c'est dans ce cas qu'ils prennent le nom de *métropolitains.*

Parfois, — en Allemagne et en Grande-Bretagne surtout — ils sont constitués en partie sur les emprises des chemins de fer nationaux (ils sont désignés en Allemagne sous le nom de *S-bahnen*) et exploités par les mêmes entreprises.

1.2. Caractéristiques des lignes

1.2.1. Tracé. — Les réseaux de métropolitains sont constitués en général par des lignes distinctes, exploitées séparément par un certain nombre de rames qui leur sont affectées :

— lignes simples parcourues de bout en bout par tous les trains (réseaux à caractère urbain) ;

— lignes avec terminus intermédiaires et lignes avec branches (surtout dans les parties périphériques des réseaux régionaux).

Les lignes exploitées en boucle sont progressivement supprimées sur tous les réseaux qui en comportaient.

Lorsque deux lignes se croisent, les voyageurs ont la possibilité de passer librement d'une ligne à l'autre grâce à des *stations de correspondance.*

Le métropolitain de New York constitue une exception importante par sa structure plus complexe : il est constitué par des sections de lignes formant un réseau maillé, et les trains empruntent des itinéraires très divers sur ces sections.

1.2.2. Infrastructure. — Les parties souterraines des métropolitains sont constituées, le plus souvent, par des souterrains à deux voies ; des souterrains à voies séparées ne sont adoptés que si cette disposition permet une construction plus économique en raison de la nature du soussol.

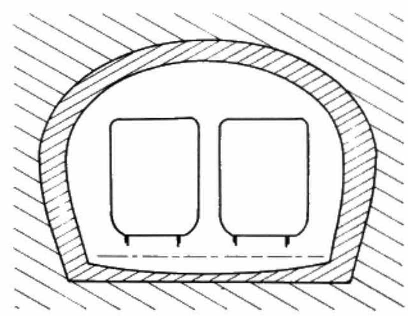


Fig. XII-3

Section voûtée

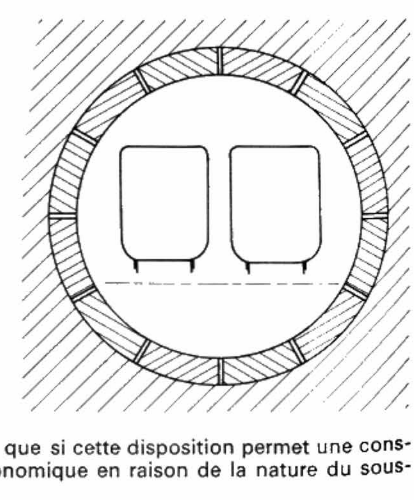


Fig. XII-4

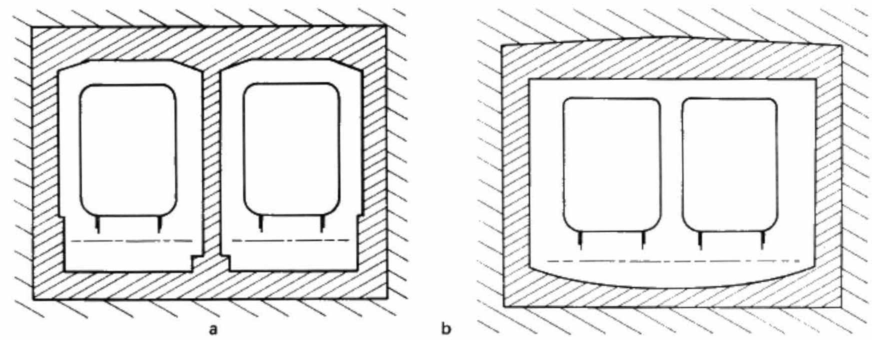
Section circulaire

La coupe du souterrain peut avoir les formes principales suivantes :

— *section voûtée* (fig. XII-3) lorsque le tunnel est construit à *l'avancement* par les méthodes habituelles dans un terrain rocheux ou dans un sous-sol sec et assez résistant;

Fig. XII-5

Section rectangulaire
a) avec piliers centraux
b) sans piliers centraux



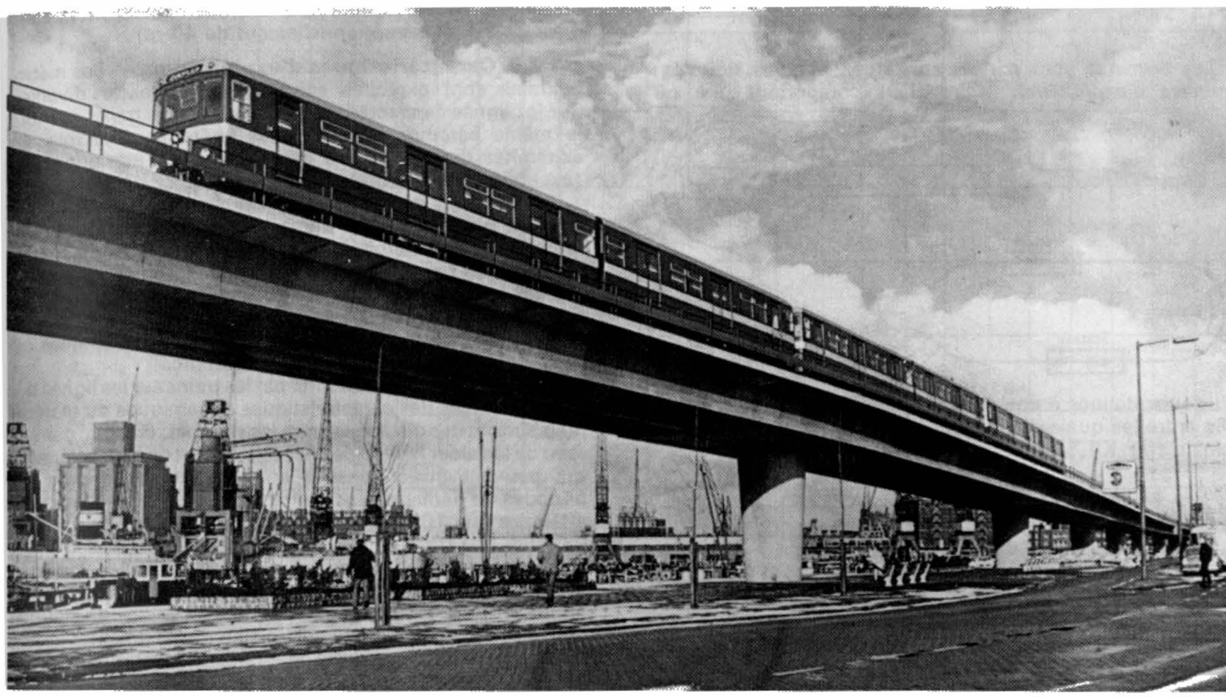


Fig. XII-6 — Viaduc du métro de Rotterdam (*R.E.T.*)

— *section circulaire* (fig. XII-4), lorsque le tunnel est construit, à *l'avancement* également, par la méthode du *bouclier* ou de la *machine à forer;* le cuvelage est alors constitué par des anneaux successifs, eux-mêmes formés de *voussoirs* métalliques ou en béton armé;

— *section rectangulaire* (fig. XII-5), avec ou sans ligne de piliers centraux, lorsque le souterrain est exécuté en *fouille ouverte;* la structure du souterrain est alors en béton armé. De multiples méthodes sont utilisées pour ce type de réalisation, suivant la nature du sous-sol et les nécessités plus ou moins impérieuses de rétablir la circulation de surface pendant les travaux.

Les viaducs de construction ancienne sont métalliques; les viaducs modernes sont établis sur une file unique de piliers en béton armé, avec des poutres en métal ou en béton armé précontraint (fig. XII-6).

Certaines sections sont établies au sol, ou en tranchée ouverte, dans des banlieues peu urbanisées; le tracé peut être combiné avec celui d'une voie routière (fig. XII-7).



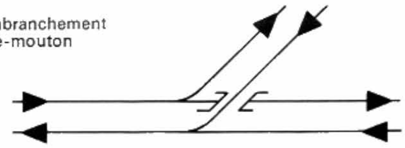
Fig. XII-7

Section extérieure du métro de Mexico (*Guyot-R.A.T.P.*)

1.2.3. Disposition des voies. — Les lignes des métropolitains ont en général deux voies ; toutefois, les réseaux les plus chargés (New York, par exemple) comportent des sections à trois ou à quatre voies permettant une exploitation intensive avec des trains de marches diverses (trains omnibus et trains directs).

Les embranchements, lorsque les réseaux en comportent, sont toujours réalisés avec un tracé à *saut-de-mouton* (fig. XII-8) évitant tout croisement à niveau entre les voies des deux branches.

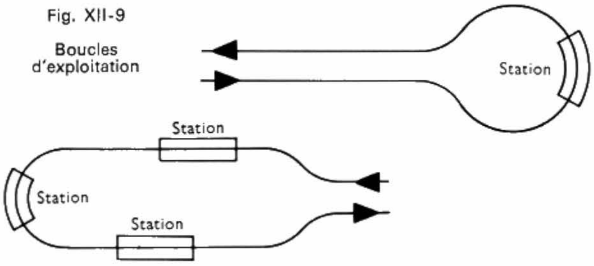
Fig. XII-8 — Embranchement avec saut-de-mouton



Les terminus sont parfois constitués par des boucles : *boucles d'exploitation* (fig. XII-9) comportant une ou

Fig. XII-9

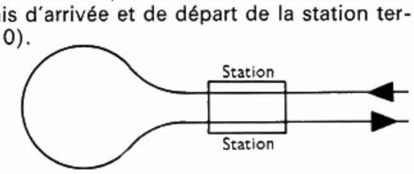
Boucles d'exploitation



plusieurs stations à une voie, ou *boucle de manœuvre* établie entre les quais d'arrivée et de départ de la station terminale (fig. XII-10).

Fig. XII-10

Boucle de manœuvre



Mais la pluspart des terminus des réseaux modernes ont une disposition *en tiroir*, plusieurs dispositions des voies étant possibles, suivant l'intervalle séparant les trains qui font leur manœuvre de retournement aux heures d'affluence (V. § 3.3).

1.2.4. Caractéristiques dimensionnelles. — La largeur extérieure du matériel roulant, qui détermine les dimensions de l'infrastructure et son prix, est presque toujours inférieure à la cote unifiée des chemins de fer, elle s'échelonne entre 2,30 m et 3,20 m (la valeur de 2,70 m est assez fréquente). À Paris, un passage de 80 cm est ménagé entre la face du matériel roulant et l'infrastructure pour permettre l'évacuation des voyageurs en cas d'incident.

Le tracé des lignes des métropolitains est souvent caractérisé par des déclivités importantes et des courbes de faible rayon. Les déclivités, qui peuvent atteindre 40 et même 60 mm par mètre, sont souvent imposées par le relief du sol, par le souci de réduire les *trémies* de passage entre souterrain et viaduc ou par des nécessités de construction des tunnels dans des couches géologiques favorables (fig. XII-11).

Le rayon des courbes, normalement de quelques centaines de mètres, peut descendre au-dessous de 100 m (à Paris il est de 75 m, exceptionnellement de 40 m).

1.2.5. Caractéristiques d'exploitation. — Les métropolitains sont exploités suivant des modalités diverses. Sur les lignes à caractéristiques urbaines, les trains ont tous le même parcours et les mêmes arrêts, sauf parfois aux extrémités des lignes que certains trains n'atteignent pas (exception : New York).

Sur les lignes longues à caractère régional (lignes à branches en particulier), les trains ont des destinations différentes et peuvent avoir des marches diverses, certains trains ne s'arrêtant pas à toutes les stations.

Dans tous les cas, les trains sont mis en service de façon à assurer le débit maximal pendant les heures de pointe du matin et du soir ; une proportion importante des rames est garée pendant les heures creuses du trafic.

La *vitesse maximale* atteinte par les trains sur les lignes des métros résulte des caractéristiques dynamiques du matériel mais surtout des distances entre les stations ; en effet, compte tenu de la valeur limitée de l'accélération et de la décélération qui peuvent être imposées aux voyageurs pendant les périodes de démarrage et de freinage, cette vitesse ne peut atteindre que 100 km/h dans des interstations de 1 000 à 2 000 m (70 km/h dans des interstations de 500 m).

La *vitesse moyenne* des trains résulte essentiellement de la distance entre les stations et du nombre des voyageurs montant et descendant, qui détermine les temps de stationnement ; cette vitesse, qui est voisine de 25 km/h pour des distances de 500 m entre stations, peut atteindre 50 à 60 km/h pour des distances de 1 000 à 2 000 m.

L'*intervalle des trains*, aux heures d'affluence, conditionne le débit des lignes : cet intervalle est imposé, en général, non par l'espacement des trains, tel qu'il est déterminé par



Fig. XII-11

Trémie de passage d'un souterrain à un viaduc (*R.A.T.P.*)

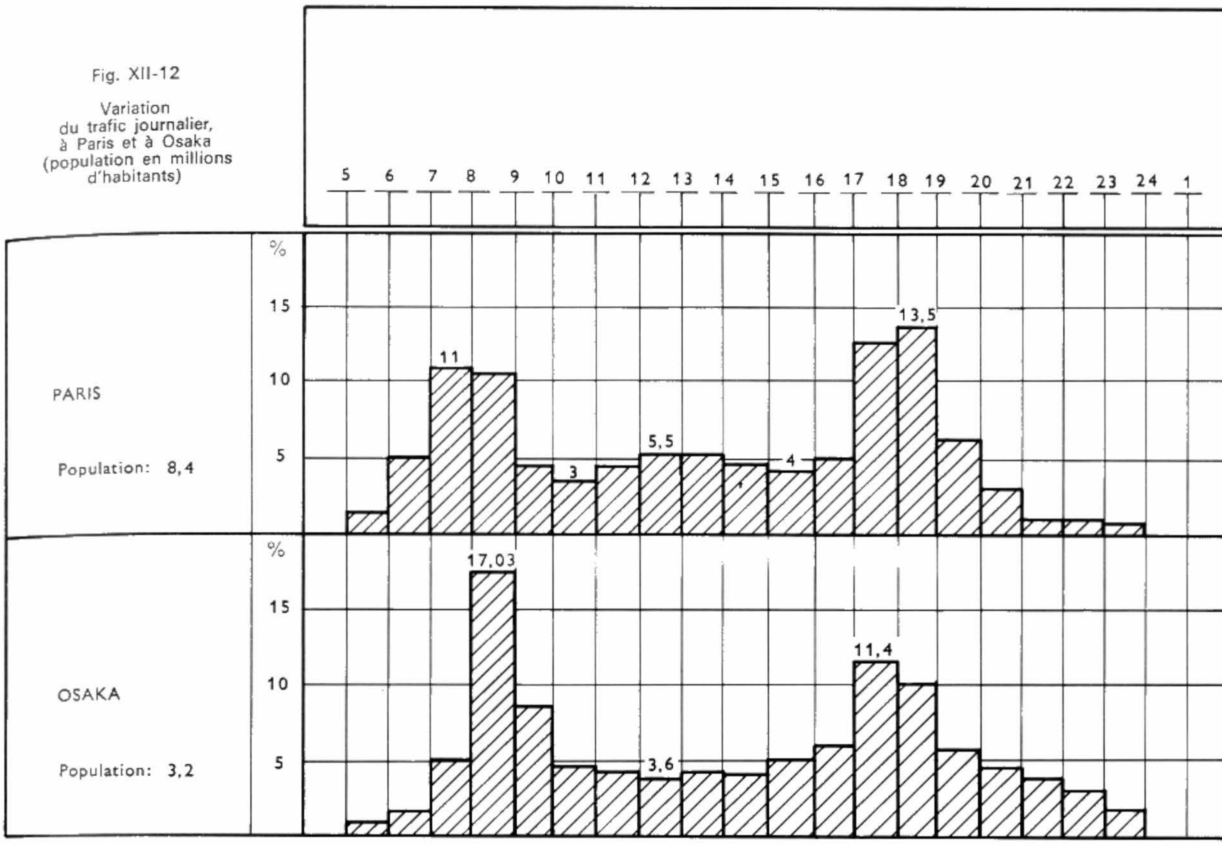


Fig. XII-12
Variation du trafic journalier, à Paris et à Osaka (population en millions d'habitants)

les signaux en ligne, mais bien par le passage successif des trains dans les stations les plus fréquentées.

L'intervalle minimal obtenu actuellement par les réseaux est proche de 90 s (soit une fréquence de quarante trains dans l'heure) ; beaucoup de réseaux s'efforcent d'atteindre ou de réduire encore ce chiffre.

Le *débit horaire maximal* d'une ligne, qui dépend de la capacité des trains et de leur fréquence, varie, suivant les réseaux, de 20 000 à 60 000 voyageurs par heure, dans un seul sens.

2. PROBLÈMES TECHNIQUES ET ÉCONOMIQUES PARTICULIERS AUX CHEMINS DE FER MÉTROPOLITAINS

L'exploitation des chemins de fer urbains est caractérisée :

— d'une part, par la multiplicité des stations et le court trajet effectué par chaque train entre deux arrêts ;

— d'autre part, par l'importance des pointes de trafic du matin et du soir (le trafic de l'heure la plus chargée peut atteindre 15 à 20 % du trafic journalier ; fig. XII-12).

Sur le plan économique, deux constatations s'imposent :

— la construction d'un métropolitain dans le centre d'une ville est une opération extrêmement onéreuse et, dans aucun pays du monde elle ne peut être faite sans une participation à caractère national ;

— les dépenses d'exploitation d'un métropolitain peuvent rarement être équilibrées par les recettes car des considérations sociales limitent presque toujours le niveau des tarifs à une valeur inférieure à celle qui serait nécessaire.

Sur le plan technique des problèmes difficiles se posent aux exploitants et surtout à ceux des réseaux anciens :

1° Adaptation continue du débit de pointe des lignes à l'accroissement général du trafic ou à son développement local dans certains quartiers.

2° Adoption de solutions garantissant le maintien de la sécurité et de la régularité de l'exploitation dans toutes les circonstances.

3° Augmentation de l'efficacité des matériels et équipements en vue d'obtenir la réduction de l'effectif du personnel nécessaire à l'exploitation ; cette action s'exerce par l'adoption de solutions techniques complexes et par une extension des dispositifs de télécommande-télécontrôle et de l'automatisation dans tous les domaines.

4° Réduction de la dépense d'énergie.

5° Amélioration du service rendu aux voyageurs (vitesse des trains, appareils élévateurs dans les stations, confort dans les trains et les stations, information).

3. LA VOIE

3.1. La voie classique. — Sur les métropolitains à roulement ordinaire, la voie est constituée par des rails du type Vignole, en général, à l'écartement normal (1,435 m) ; toutefois, le réseau de San Francisco, ouvert en 1972, a adopté un écartement plus grand (1,670 m).

Le plus souvent les rails sont soudés en grandes longueurs pour éviter le bruit et faciliter l'entretien.

Les rails sont souvent posés sur traverses et ballast. Mais de nombreux réseaux tendent à adopter une pose directe sur le radier en béton, avec interposition de cales élastiques ; une telle pose doit permettre la réduction de la hauteur du tunnel, une diminution des vibrations transmises à l'environnement et la simplification des opérations d'entretien.

3.2. La voie pour roulement sur pneumatiques. — Plusieurs réseaux ont adopté le roulement sur pneumatiques (Paris : certaines lignes — Montréal — Mexico) qui réduit l'encombrement de la voie car ses éléments peuvent alors être posés directement sur le radier, et présente d'autres avantages très sensibles : réduction des bruits et des vibrations, grande adhérence.

La voie, pour le roulement sur pneumatiques (V. fig. XII-13), comporte deux pistes métalliques ou en béton armé pour la circulation des roues porteuses sur pneumatiques ; deux barres métalliques latérales assurent le guidage, en servant d'appui à des galets à pneumatiques, à axe vertical,

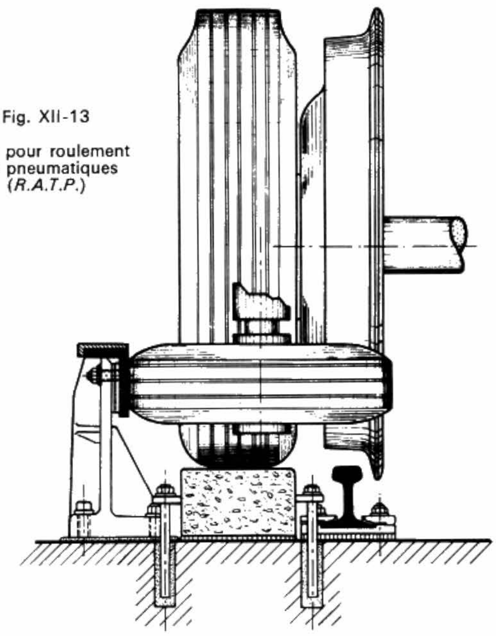


Fig. XII-13

Voie pour roulement sur pneumatiques (*R.A.T.P.*)

montés aux quatre angles du bogie (ces barres servent également à l'alimentation des trains en courant de traction ; fig. XII-14)

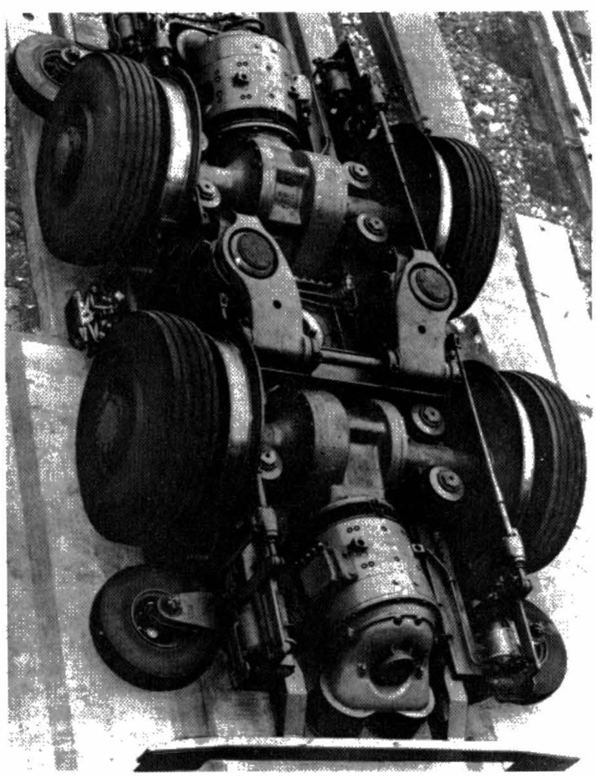


Fig. XII-14 — Bogie à roulement sur pneumatiques (*R.A.T.P.*)

De plus, deux rails métalliques ordinaires, à écartement normal, sont posés entre les pistes de roulement ; ils assurent, en cas de dégonflement d'un pneumatique, le roulement ou le guidage en donnant alors appui à des roues de sécurité métalliques, jumelées avec les roues porteuses principales ; les boudins de ces roues guident les bogies au passage des appareils de voie, de type courant, qui assurent la continuité des rails.

3.3. Les appareils de voie. — Les appareils de voie (aiguillages, traversées et leurs diverses combinaisons) sont particulièrement nombreux sur les lignes de métro : voies de manœuvre et de garage des terminus, embranchements, communications entre voies permettant l'établissement de services partiels provisoires.

Les voies principales des terminus doivent permettre le *retournement* des trains dans un temps très court, lié à l'intervalle des trains en ligne ; elles présentent plusieurs dispositions principales :

— avec *manœuvre d'avant-gare,* une seule position à quai servant pour l'arrivée et le départ des trains (cette disposition ne convient que pour des intervalles assez longs ; fig. XII-15) ;

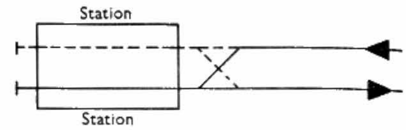


Fig. XII-15

Terminus en tiroir avec manœuvre d'avant-gare

— avec *manœuvre « en tiroir » d'arrière-gare,* qui est réalisée entre la position d'arrivée et celle de départ (fig. XII-16).

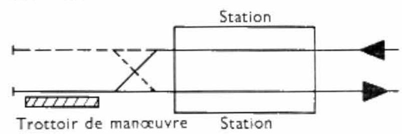


Fig. XII-16

Terminus en tiroir avec manœuvre d'arrière-gare

— avec *double tiroir,* par avant-gare et par arrière-gare, avec trois voies encadrant deux quais, cette disposition permet les intervalles entre trains les plus réduits (fig. XII-17).

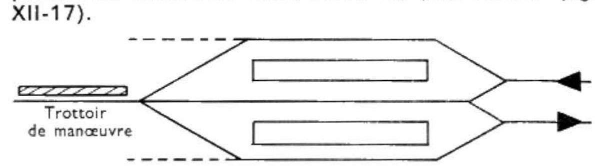


Fig. XII-17 — Terminus à double tiroir

Les terminus sont complétés par des voies de garages pour le stationnement des rames inactives pendant les heures creuses et l'interruption nocturne du service. Ces garages sont, suivant les réseaux, disposés dans le voisinage immédiat des voies principales (souvent en souterrain), ou constitués par des faisceaux de voie, à l'extérieur, parfois combinés avec les ateliers d'entretien.

3.4. L'entretien de la voie. — L'entretien de la voie des métros pose aux exploitants des problèmes difficiles car la fréquence des trains et la pose en tunnel interdisent toute surveillance ou toute intervention pendant les heures de service normal. L'entretien est facilité, d'une part, par l'adoption d'une voie robuste et, d'autre part, par l'utilisation d'un matériel moderne mécanisé transporté par des trains de travaux spécialisés.

Sur un certain nombre de réseaux, le passage répété de trains de composition identique engendre une *usure ondulatoire* du rail, particulièrement dans les courbes de faible rayon ou en station (le mécanisme exact de formation de cette usure est encore assez mal connu). Les réseaux doivent mettre en œuvre des *trains meuleurs* spéciaux (à meules fixes ou rotatives) pour faire disparaître cette usure dont l'amplification détermine des vibrations importantes au passage des trains.

4. LE COURANT DE TRACTION

4.1. Le choix du courant - Mode d'alimentation. — Tous les métros, même les plus récents, ont adopté la traction par courant continu, sous 500 à 1 500 V ; ce courant ne demande que des appareillages de faible volume pour l'équipement des multiples motrices des trains.

L'avantage principal du courant alternatif à haute tension pour la grande traction — la réduction du nombre et de l'importance des sous-stations — ne joue pas, en effet, pour les réseaux urbains où les sous-stations sont multipliées le long des lignes.

L'alimentation en courant continu sous 1 500 V, par ligne de contact aérienne, est utilisée sur certaines lignes de métros comportant des parties extérieures importantes (lignes régionales). Mais la très grande majorité des réseaux a choisi l'alimentation par *troisième rail*, avec des tensions allant de 500 à 1 000 V. En effet, le troisième rail s'accommode de sections de tunnel de hauteur réduite, il est très robuste et son entretien est aisé.

Il est fixé par des supports isolants sur les traverses de la voie : la prise de courant sur ce rail se fait soit au-dessus (fig. XII-18), soit latéralement, soit au-dessous (fig. XII-19) ; cette dernière disposition est surtout adoptée sur les lignes à parcours extérieurs dans les pays à climat très froid.

Sur la voie à roulement sur pneumatiques, l'alimentation en courant est faite par les barres de guidage dont les supports sont isolants.

Le retour du courant de traction se fait par les rails de roulement ; toutefois, de très rares réseaux, dont celui de Londres, utilisent un rail spécial de retour dans l'axe de la voie. Là où les rails comportent des *joints isolés* pour la constitution de cantons de signalisation, la continuité du retour du courant est assurée par des *connexions inductives* qui forment barrière pour le courant alternatif de signalisation en laissant passer le courant continu (fig. XII-20).

4.2. Les postes de redressement. — Le courant de traction d'une ligne de métro est fourni par des *postes de redressement* (ou *sous-stations*) qui transforment le courant alternatif sous haute tension en courant continu sous moyenne tension ; ces postes sont maintenant, le plus souvent, équipés de redresseurs au silicium.

Les postes de redressement sont répartis sur une ligne de façon à se prêter mutuellement assistance en cas de panne, la tendance actuelle étant à l'utilisation de postes monogroupes nombreux de faible puissance ; ils sont installés, soit dans des bâtiments très voisins de la ligne, soit en souterrain dans les stations.

Les postes de redressement, à commande automatique, sont eux-mêmes alimentés en haute tension, soit par le réseau général d'électricité de la ville, soit par des *postes de transformation* à forte puissance, affectés exclusivement au métropolitain.

Les postes de redressement et les postes de transformation sont contrôlés et télécommandés à partir de *salles de contrôle* (fig. XII-21).

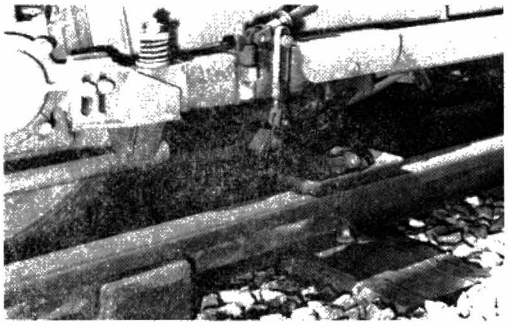


Fig. XII-18 — Troisième rail à prise au-dessus (Paris) (*R.A.T.P.*)

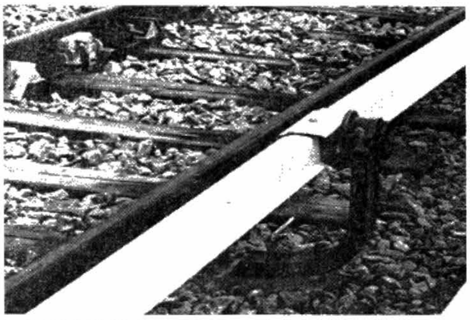


Fig. XII-19

Troisième rail à prise en dessous (Berlin) (*BVG*)

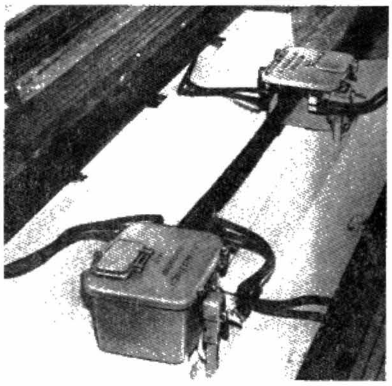
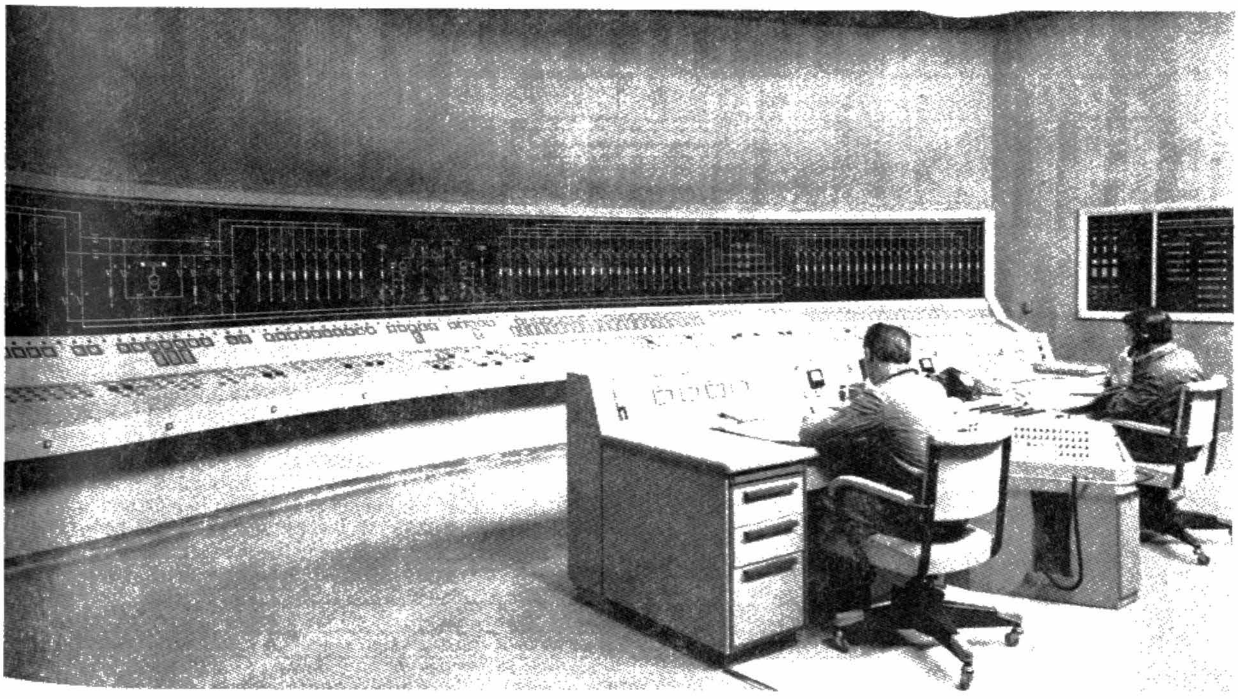


Fig. XII-20

Connexions inductives (Paris) (*R.A.T.P.*)

Fig. XII-21 — Salle de contrôle des postes de redressement et de transformation (*R.A.T.P.*)



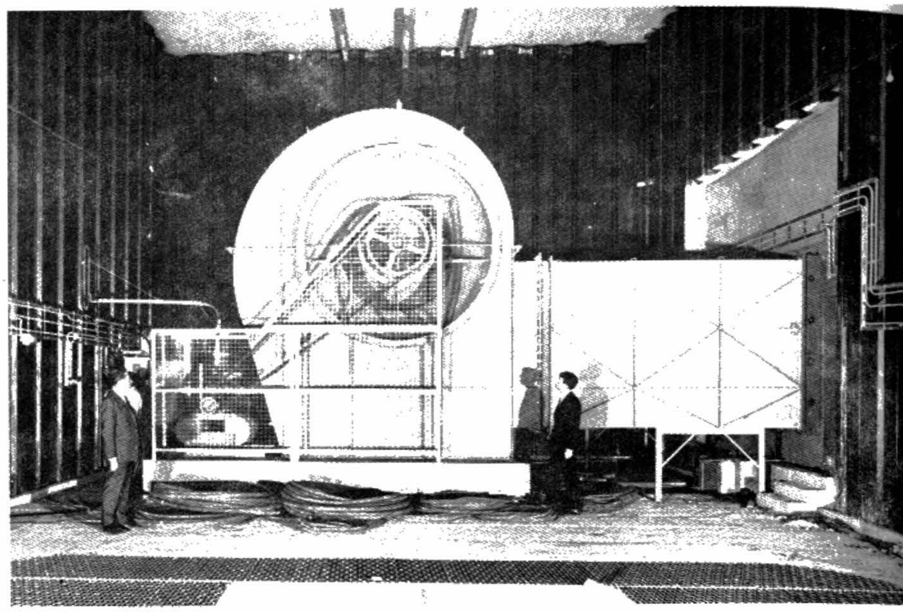


Fig. XII-22

Poste de ventilation de tunnel (*R.A.T.P.*)

4.3. La distribution du courant sur la ligne. — Pour son alimentation par les postes de redressement, la ligne est elle-même décomposée en un certain nombre de sections de voie, sur lesquelles le courant peut être coupé et rétabli, de façon indépendante en cas d'incident, par des contacteurs télécommandés. La coupure du courant sur une section peut être obtenue par les agents de l'exploitation de la ligne, soit en téléphonant au personnel spécialisé, soit directement à partir de coffrets de déclenchement ou d'autres dispositifs répartis le long des voies.

À Paris, la responsabilité de la coupure et du rétablissement du courant sur les sections de voie est donnée directement aux services de l'exploitation. Au poste central d'exploitation (V. § 7.3) ces services disposent de moyens de télécontrôle et de télécommande spécialisés qui permettent de prendre, avec le maximum de sécurité, toutes les dispositions utiles en cas d'incident sur la ligne : court-circuit, accident grave, etc.

Le poste central d'exploitation de Paris est en liaison directe et permanente avec la salle de contrôle des postes de redressement et de transformation. La responsabilité de celle-là porte essentiellement sur la mise en service des postes et la prise des mesures en cas d'incident sur le réseau d'alimentation à haute tension : transformateurs, câbles, etc.

5. L'ÉCLAIRAGE ET LA VENTILATION

5.1. L'éclairage. — L'alimentation des circuits d'éclairage des tunnels et stations des métros est établie de façon à interdire de façon absolue l'extinction totale de l'éclairage : câbles et postes de transformation dédoublés, indépendants de l'alimentation de traction ; circuits d'éclairage de sécurité alimentés par des batteries locales à recharge automatique ; groupes électrogènes à démarrage automatique en cas de manque d'alimentation.

Suivant les réseaux, les tunnels sont éclairés en permanence ou éteints en service normal.

5.2. La ventilation. — Les souterrains des métros doivent être ventilés, non seulement pour que l'air intérieur

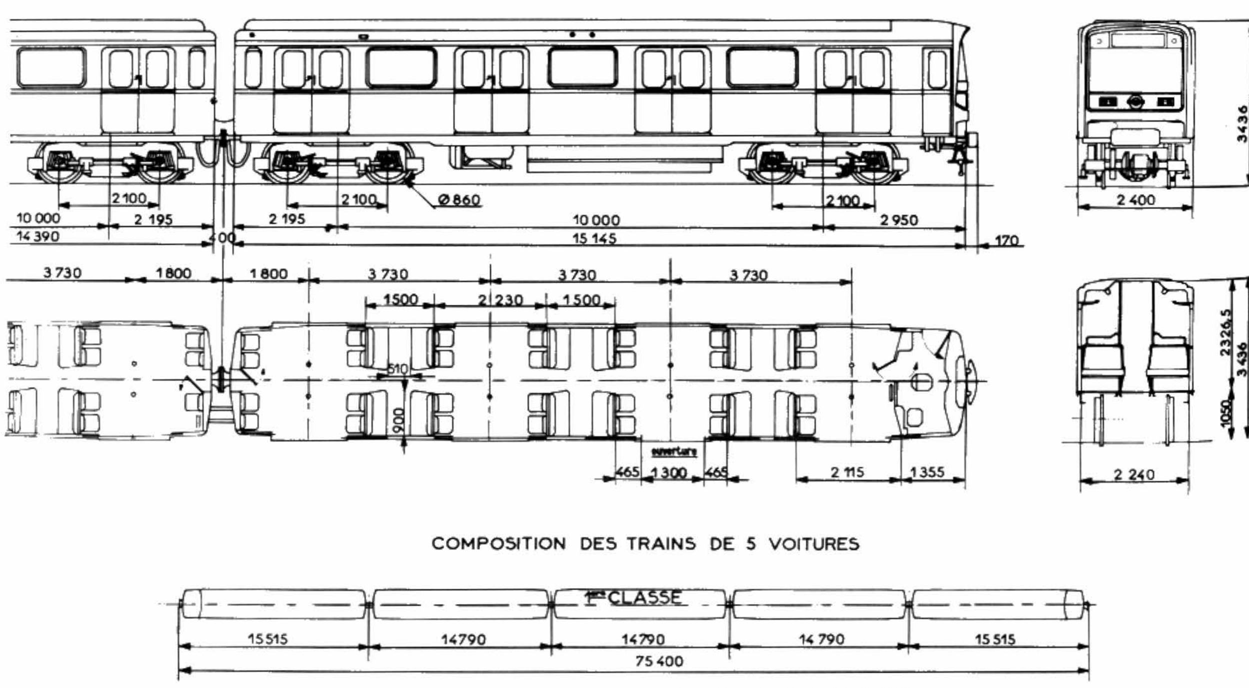


Fig. XII-23 — Rame de cinq voitures du métro de Paris (*R.A.T.P.*)

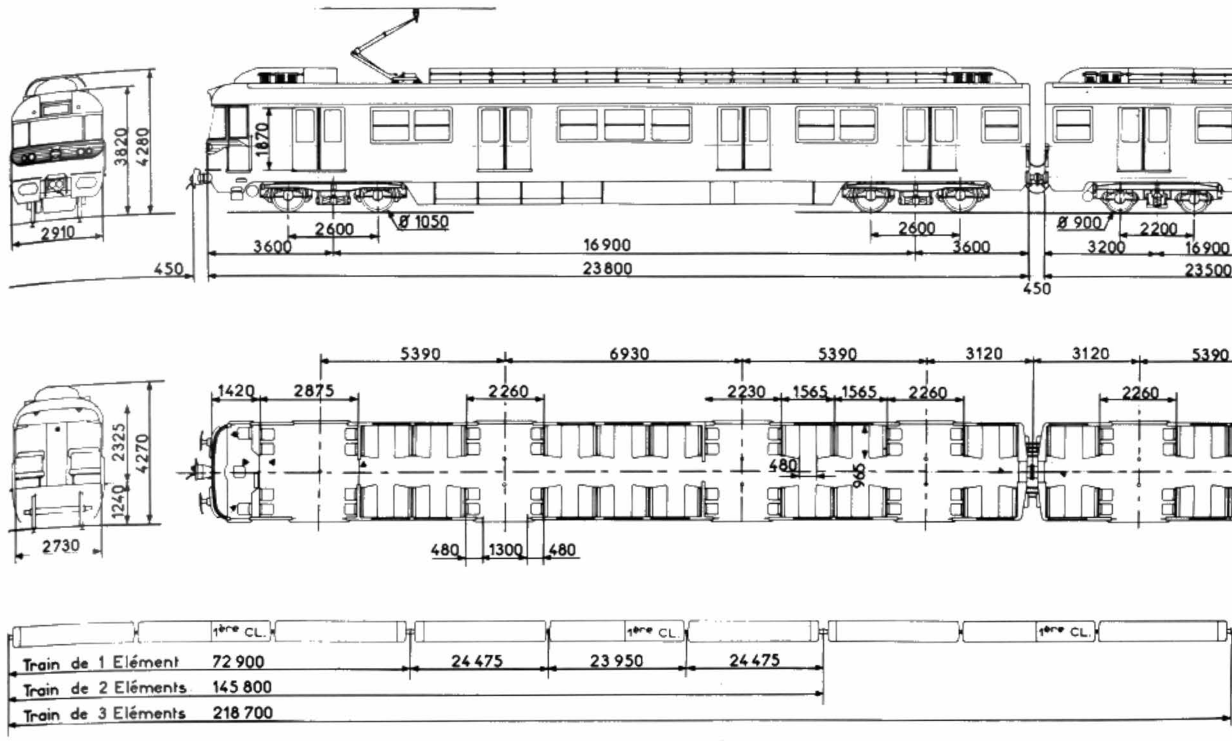


Fig. XII-24 — Train de trois, six ou neuf voitures du réseau régional de Paris (*R.A.T.P.*)

ne soit pas pollué par la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone dégagés par les voyageurs mais surtout pour empêcher l'élévation de la température en raison de la chaleur engendrée par les trains (au démarrage, par les équipements rhéostatiques et au freinage, par la transformation de l'énergie cinétique en chaleur).

Sur les réseaux peu chargés, la ventilation naturelle, par les accès des stations ou par des ouvertures spécialement prévues, activée par le déplacement des trains, est suffisante.

En revanche, sur les réseaux à trafic intense, le renouvellement de l'air du souterrain est assuré par des postes de ventilation mécanique, disposés entre les stations : des ventilateurs aspirent l'air du tunnel pour le rejeter à l'extérieur, l'air frais entre par les accès des stations ou bien il est insufflé par d'autres ventilateurs, voisins de ces stations, pour éviter les courants d'air (fig. XII-22).

Les stations très fréquentées nécessitent parfois un traitement spécial : aspiration de l'air chaud produit par les trains, grâce à des ouvertures ménagées sous les quais, climatisation avec distribution d'air réfrigéré.

6. LE MATÉRIEL ROULANT

6.1. La composition des trains

6.1.1. Motrices et remorques. — Les trains des métros sont constitués, soit uniquement par des voitures motrices dont tous les essieux sont moteurs, solution dite à *adhérence totale*, soit par des motrices et des remorques (V. fig. XII-1).

L'emploi de motrices nombreuses permet d'obtenir les efforts de traction qui sont nécessaires pour franchir les fortes rampes (40 mm par mètre et plus) et pour dégager rapidement les stations, en vue de l'obtention de vitesses moyennes suffisantes et d'intervalles réduits malgré le resserrement des stations.

La multiplicité des motrices a l'avantage de garantir la régularité de l'exploitation, même en cas de panne de l'équipement de traction d'une voiture d'un train. L'emploi de remorques, de son côté, réduit la demande de courant au démarrage ainsi que les dépenses d'investissement et d'entretien ; en cette matière, l'adhérence du roulement sur pneumatiques permet une meilleure utilisation des motrices et une augmentation du nombre des remorques (une remorque pour deux motrices, par exemple).

6.1.2. Longueur des trains - Éléments. — Suivant les réseaux, la composition des trains d'une ligne est constante, ou bien elle peut être changée suivant les heures de la journée ; l'utilisation de rames plus courtes aux heures creuses peut, en effet, déterminer une économie d'énergie sensible, qui justifie les manœuvres parfois complexes de modification de la composition des rames (fig. XII-23 et XII-24).

Cette modification est facilitée par l'utilisation d'*éléments de trains* accouplables, éléments de composition fixe, de deux ou trois voitures, pouvant circuler isolément ; un élément comporte à chacune de ses extrémités un dispositif d'attelage automatique intégral, assurant la continuité des canalisations pneumatiques et électriques (fig. XII-25).

Quelques réseaux utilisent des *éléments articulés*, constitués soit par deux caisses montées sur trois bogies, soit

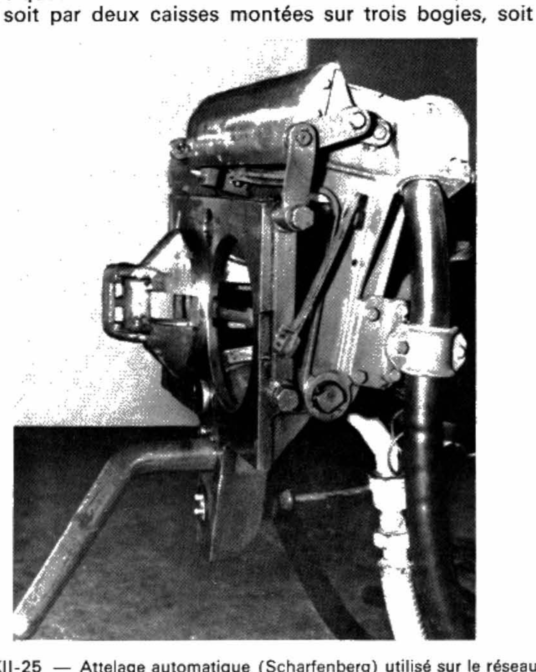


Fig. XII-25 — Attelage automatique (Scharfenberg) utilisé sur le réseau régional de Paris (*R.A.T.P.*)



Fig. XII-26

Élément articulé à trois caisses du métro de Hambourg (*HHA*)

par trois caisses sur quatre bogies; cette disposition, qui apporte une difficulté notable pour l'entretien du matériel, n'est adoptée que si la longueur des caisses se trouve limitée à une faible valeur par des impératifs géométriques des lignes: longueur des quais, rayon des courbes (Hambourg; fig. XII-26).

6.1.3. Le personnel des trains. — Suivant les réseaux, un train est accompagné par un *conducteur* seul, ou par un conducteur et un *garde* (ou *chef de train*).

Le garde se tient, soit en tête du train, soit en queue, soit au milieu; son rôle est d'assurer, seul ou en collaboration avec le conducteur, la surveillance des échanges de voyageurs dans les stations et la commande des portes; sur les réseaux où il est placé en tête du train, il donne au conducteur l'ordre du départ des stations (Moscou) et peut participer à la surveillance de la signalisation.

Dans certaines villes, la longueur des trains et l'affluence des voyageurs nécessitent l'emploi de plusieurs gardes répartis le long du train (New York).

Le conducteur occupe une des *cabines* (*ou loges*) *de conduite* aménagées aux extrémités des trains de composition fixe, ou à celles des éléments accouplables. Sur les matériels anciens, il y avait une cabine de conduite sur chaque voiture motrice, pour en permettre la manœuvre isolément dans les ateliers; cette disposition tend à être abandonnée car elle réduit de façon notable la capacité des trains. On trouve donc des motrices avec ou sans cabines.

Le garde se tient, soit dans une cabine de conduite, soit à un poste spécialement aménagé pour lui dans un compartiment à voyageurs.

Lorsque le conducteur et le garde ne sont pas ensemble, leurs deux postes sont réunis par une liaison téléphonique qui, en général, permet également les annonces aux voyageurs des trains.

6.2. La structure du matériel roulant

6.2.1. La caisse. — Les caisses des voitures des métros, construites soit en acier, soit en alliage léger, sont montées sur des bogies à deux essieux; la plupart des équipements électriques et pneumatiques sont montés sous les planchers de la caisse, entre les bogies.

La largeur des caisses varie, suivant les réseaux, de 2,30 m à 3,20 m; la cote de 2,70 est la plus courante car elle concilie un faible encombrement (qui conditionne les dimensions des tunnels) à une possibilité d'aménagement intérieur convenable (deux sièges transversaux à deux places avec passage central).

La longueur des caisses va de 11 m pour les réseaux ayant des courbes de très faible rayon, à 22 ou 23 m pour les réseaux à grand gabarit; une longueur comprise entre 14 et 17 m est très courante.

Les portes latérales, au nombre de trois ou quatre par face de voiture, sont réparties également le long du train pour faciliter les échanges de voyageurs dans les stations. Elles ont deux vantaux conjugués se déplaçant en général dans l'épaisseur de la charpente de caisse (certains réseaux adoptent des portes dont les vantaux se déplacent à l'extérieur de la charpente). La largeur d'ouverture atteint maintenant 1,30 m, largeur qui permet le passage simultané de deux personnes.

En général, les portes de bout des voitures ne sont utilisées que pour le service ou en cas d'accident. Quelques réseaux (New York, Japon) laissent les voyageurs passer librement d'une voiture à l'autre pendant la marche.

6.2.2. Les bogies. — Le bogie des voitures des métropolitains groupe dans un ensemble complexe, surtout lorsqu'il s'agit du bogie moteur, tous les organes mécaniques de roulement, de suspension, de freinage et de traction. Il présente des dispositions très diverses suivant les réseaux, avec une évolution continue dans le sens de l'allégement et de l'accroissement de la robustesse (fig. XII-27).

Les essieux, pour le roulement ordinaire, ont des roues bandagées, monoblocs ou élastiques, sans que l'un de ces trois types ait pu être universellement adopté, en raison de l'incidence de ce choix sur l'usure ondulatoire de la voie, la production du bruit et le prix du matériel.

Avec le roulement sur pneumatiques, les essieux font partie d'un « pont » du type automobile, avec différentiel pour les essieux moteurs.

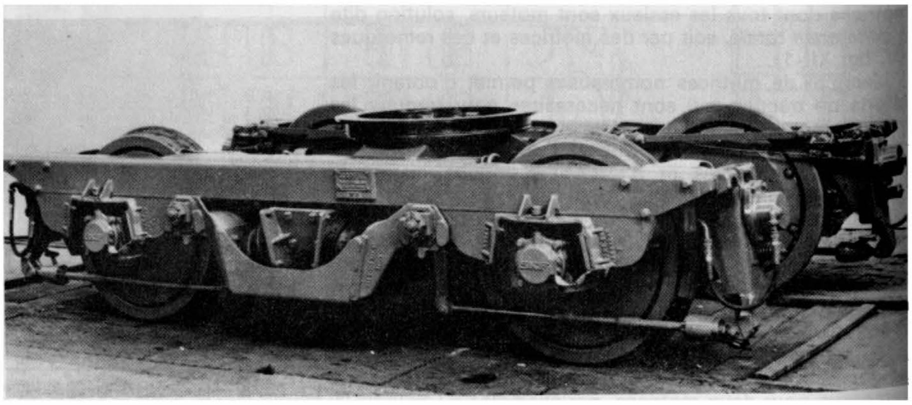


Fig. XII-27

Bogie moteur (*R.A.T.P.*)



Fig. XII-28

Intérieur d'une voiture à sièges longitudinaux à Osaka

La suspension, primaire entre essieux et châssis de bogie, secondaire entre bogie et caisse, fait appel de plus en plus à des ressorts en caoutchouc ou mixtes (caoutchouc et métal) ; l'utilisation d'une suspension secondaire pneumatique est de plus en plus fréquente car elle permet le maintien de la caisse à un niveau constant quelle que soit la charge.

Les moteurs de traction, toujours inclus dans les bogies, sont montés de façons très diverses suivant les constructeurs ; disposés transversalement ou longitudinalement, ils sont, soit entièrement suspendus et solidaires du châssis, attaquant les essieux par des transmissions élastiques, soit partiellement suspendus aux essieux.

La tendance actuelle prévoit des moteurs de plus en plus légers et rapides avec des boîtes de réduction à engrenages perfectionnés.

Le freinage mécanique est du type à sabots (sur les bandages) ou à disques (calés sur les essieux ou les axes des moteurs).

6.3. L'aménagement des caisses

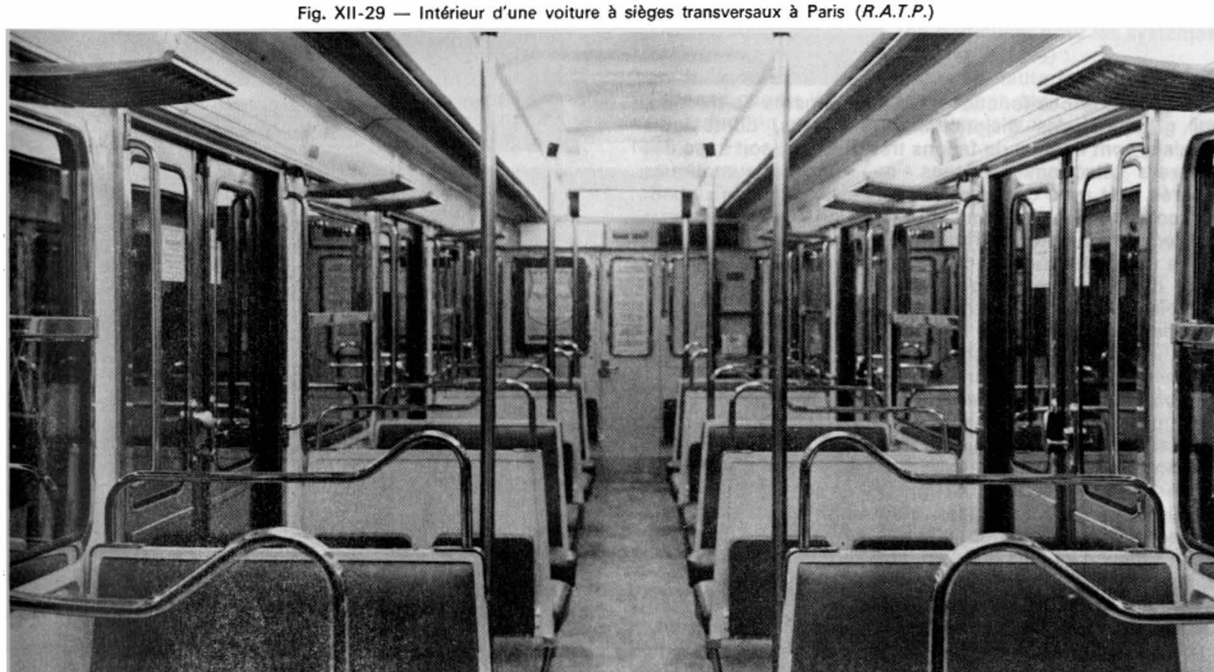
6.3.1. Sièges et appuis. — Les sièges sont disposés de diverses façons suivant l'importance du trafic et le confort consenti aux voyageurs : sièges longitudinaux adossés aux cloisons laissant une place importante aux voyageurs debout (fig. XII-28), sièges transversaux se faisant face et délimitant des *plates-formes* (fig. XII-29), dispositions intermédiaires.

L'utilisation des strapontins sur les plates-formes permet d'augmenter le nombre des voyageurs assis pendant les heures creuses.

Les appuis mis à la disposition des voyageurs debout sont des barres horizontales ou verticales, des poignées souples ou articulées fixées au plafond.

6.3.2. Portes. — Les portes sont en général commandées à la fermeture et à l'ouverture grâce à des moteurs pneumatiques ou électriques. À Paris, l'ouverture de chaque porte reste subordonnée à l'actionnement par les voyageurs d'une serrure locale.

Fig. XII-29 — Intérieur d'une voiture à sièges transversaux à Paris (*R.A.T.P.*)



6.3.3. Éclairage — Ventilation — Chauffage. — L'éclairage est en général obtenu par des tubes fluorescents alimentés par le courant de traction, transformé à cet effet. Un éclairage de secours, sur batterie, intervient en cas de manque de courant de traction.

Suivant le climat et l'importance relative des parcours souterrains et aériens, les voitures sont équipées de divers systèmes :

— ventilation par glaces ouvrantes, par aérateurs de toiture, par aubes directrices utilisant le mouvement des trains pour forcer l'entrée ou la sortie de l'air ;

— ventilateurs électriques déplaçant l'air intérieur ou en assurant le renouvellement ;

— radiateurs électriques ou batteries chauffantes incluses dans le système de ventilation ;

— système complet de climatisation (aux États-Unis d'Amérique) assurant le chauffage ou le refroidissement de l'air.

6.4. Traction et freinage

6.4.1. Traction. — Le courant électrique de traction est capté, sur chaque motrice, à l'aide d'un pantographe, en cas d'alimentation par caténaire, ou au moyen de frotteurs montés sur les bogies si l'alimentation est faite par troisième rail.

Sur chaque motrice, les moteurs, montés sur les bogies, sont contrôlés par un *équipement de traction* commandé par le manipulateur de la cabine de conduite par l'intermédiaire d'une *ligne de train* à basse tension.

Le démarrage des moteurs est assuré, de façon rhéostatique, par élimination de résistances. Cette action est combinée au couplage des moteurs en série puis en parallèle et à une réduction du champ inducteur.

Sur de nombreux réseaux, les moteurs sont également utilisés pour le freinage électrique ; ils sont alors montés en génératrices dont les inducteurs sont alimentés de façon séparée (par un groupe moteur-générateur). Ils débitent alors dans des résistances dont la valeur est réglée par le jeu de l'équipement de traction, de façon à donner un effort de freinage constant (du moins jusqu'aux faibles vitesses).

6.4.2. Freinage. — Les sabots de freinage des bogies s'appliquent sur les roues ou sur des disques et sont actionnés par des cylindres pneumatiques.

Les cylindres de frein d'un train sont commandés, en général, de façon électropneumatique, à partir de la cabine de conduite. Cette commande assure une action automatique en cas d'incident et une action rapide et simultanée sur toute la longueur du train, ainsi que la modérabilité de l'effort de freinage.

Tous les systèmes modernes permettent un réglage automatique du freinage suivant la charge du train, pour obtenir les mêmes décélérations dans toutes les circonstances de l'exploitation et avec le maximum d'efficacité permis par l'adhérence.

Lorsque le freinage électrique est utilisé, divers dispositifs assurent l'action combinée de ce freinage avec celui par sabots : intervention de ce dernier aux faibles vitesses ou en cas d'incident électrique.

Sur les matériels modernes, un seul manipulateur commande la traction et le freinage, chaque position de ce manipulateur correspondant à une accélération ou décélération déterminée, quelle que soit la charge du train.

Les sabots de freins peuvent également être appliqués, à l'arrêt du train, pour obtenir l'immobilisation de la rame ; la commande en est, soit locale, soit générale (par l'action de ressorts et de dispositifs électriques).

6.5. Cabine de conduite. — La cabine de conduite d'une voiture, motrice ou remorque, doit pouvoir être facilement mise en service lorsqu'elle se trouve en tête d'un train (fig. XII-31).

L'équipement des cabines de conduite est plus ou moins complet, suivant les réseaux. En dehors des organes servant à la conduite du train (traction et freinage), il peut comporter des interrupteurs, cadrans et voyants permettant, d'une part, la mise en service de tous les appareillages de traction, de freinage et auxiliaires de toutes les voitures du train, d'autre part, la vérification à distance du bon fonctionnement de tous les organes du train (pour la traction et le freinage en particulier).

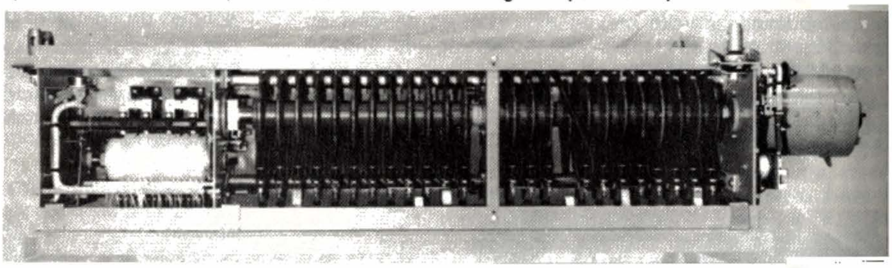


Fig. XII-30

Équipement de traction
(arbre à cames à commande électrique)
(*Jeumont-R.A.T.P.*)

Pour assurer ces fonctions, les équipements de traction, qui groupent des disjoncteurs, inverseurs, contacteurs et relais, sont conçus de façons très diverses, soit avec des appareils électromagnétiques ou électropneumatiques séparés, soit avec des appareils actionnés successivement par un arbre à cames, mû lui-même de façon électrique ou électropneumatique (fig. XII-30).

Ces dernières années, dans plusieurs pays on a mis au point des *équipements de traction à thyristors* (sous les vocables divers d'équipements à *hacheurs de courant*, *à choppers* ou *à pulseurs*). Ces équipements, qui ne mettent en œuvre que des éléments statiques, découpent le courant d'alimentation des moteurs en impulsions de fréquence ou d'amplitude variable, réalisant ainsi une alimentation à tension moyenne croissante et assurant un démarrage sans résistances (donc sans pertes). Ces équipements peuvent également assurer aisément le freinage par récupération en renvoyant sur la ligne le courant des moteurs fonctionnant en génératrices, alors que jusqu'à présent le freinage par récupération n'avait pas pu être obtenu, de façon efficace et sans incident, sur les trains des métropolitains.

Les équipements de traction à thyristors permettent à la fois une réduction de la dépense d'énergie et une réduction de l'énergie dissipée dans les tunnels sous forme de chaleur ; ces deux avantages sont très importants pour les métropolitains.



Fig. XII-31 — Cabine de conduite (Londres) (*LT*)

Les appareillages de sécurité de la cabine comprennent en général :

— des voyants traduisant la signalisation de la ligne, ou répétant les feux fixes de la signalisation ; (V. § 7.1).

— un appareil chronotachymètre enregistreur ;

— un dispositif de *vigilance* ou *d'homme mort* assujettissant le conducteur à certains gestes (boutons à pousser, par exemple) pour vérifier à tout moment sa vigilance.

7. LES INSTALLATIONS DE SÉCURITÉ ET DE TÉLÉCOMMUNICATIONS — L'AUTOMATISATION DE LA MARCHE DES TRAINS

7.1. La signalisation. — La signalisation des réseaux métropolitains (manœuvre et espacement) est basée de façon classique sur l'utilisation de *cantons de voie* matérialisés par des *circuits de voie*. L'adoption de circuits de voie sans joints, avec des courants à fréquence sonore, pour la signalisation d'espacement, tend à s'étendre en raison des avantages présentés par la suppression des joints isolants.

Certains réseaux recherchent la possibilité d'une signalisation *à cantons mobiles* qui permettrait, par rapport au système à cantons fixes, la réduction des intervalles entre trains.

En ce qui concerne la transmission aux trains des indications de la signalisation, de nombreuses dispositions sont adoptées sur les divers réseaux, déduites de deux solutions principales :

— signalisation dite *latérale* par des signaux à feux colorés implantés le long de la voie (fig. XII-32) ;

— signalisation *en cabine* (*cab-signal*) dans laquelle les ordres sont donnés au conducteur par un tableau de voyants lumineux dans sa cabine de conduite (fig. XII-33)

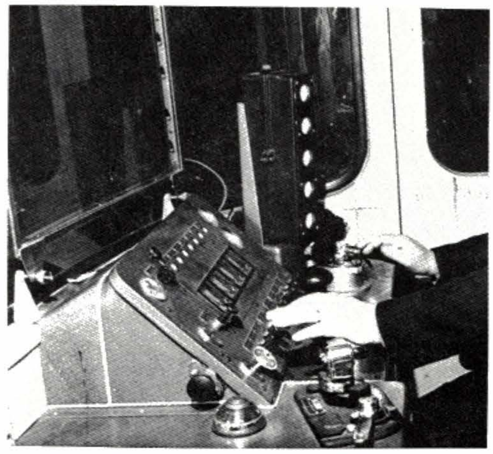


Fig. XII-33 — Signalisation en cabine (Milan) ; le tableau des voyants est à droite du pupitre (*A.T.M.*)

(suivant les réseaux cette signalisation est, ou non, complétée ou doublée par une signalisation latérale).

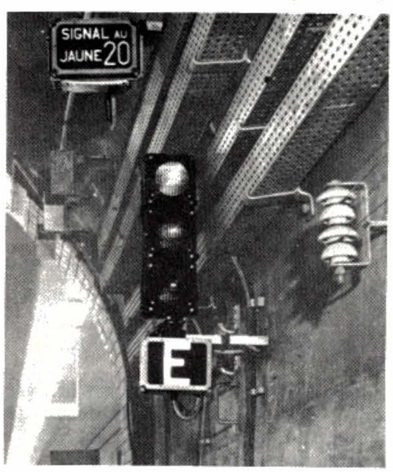


Fig. XII-32

Signal à feux colorés (*R.A.T.P.*)

Les indications visuelles de la signalisation peuvent être complétées ou confirmées sur les trains de diverses façons :

— enregistrement sur la bande d'un appareil chronotachymètre enregistreur, pour la vérification a posteriori de la correction de la conduite ;

— répétition sonore ou visuelle ;

— commande de l'arrêt automatique en cas de franchissement d'un signal à l'arrêt ;

— contrôle des vitesses (*Automatic Train Control : ATC*) assurant automatiquement le déclenchement du freinage et éventuellement l'arrêt du train, si le conducteur n'a pas obéi correctement aux indications de la signalisation ;

— pilotage automatique (*Automatic Train Operation : ATO*) comme nous le verrons plus loin (V. § 7.4.1).

Différents systèmes de liaison entre la voie et les trains concourent à la transmission matérielle des indications de la signalisation :

— contact mécanique entre un levier, levé si le signal est au rouge, et un robinet de frein du train (système d'arrêt automatique de type ancien très répandu) ;

— *balises* de la voie transmettant au train, au passage, une indication par induction électromagnétique ou par simple action magnétique (en particulier pour les systèmes d'arrêt automatique modernes ; fig. XII-34) ;

— induction par des courants (à haute fréquence, ou à fréquence sonore ou codés) circulant dans les rails ;

— induction par des câbles spéciaux posés entre les rails.

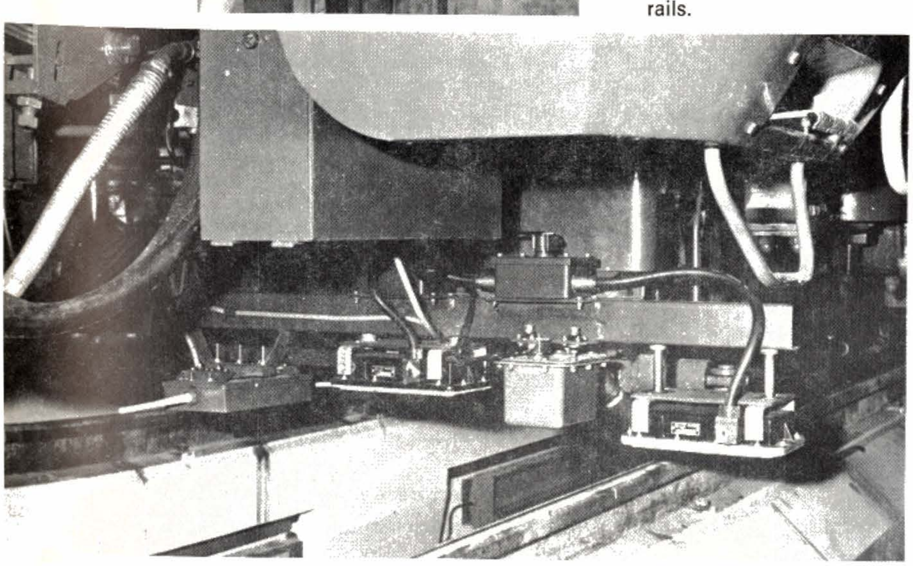


Fig. XII-34

Organes montés sur les trains pour les liaisons avec la voie (de gauche à droite) :
— antenne d'émission pour identification du train
— capteur correspondant à une balise électromagnétique de la voie
— capteur recevant des indications par des courants à haute fréquence passant dans le rail
— capteur correspondant à une balise électromagnétique
(*R.A.T.P.*)



Fig. XII-35 — Poste central de contrôle de l'exploitation (*R.A.T.P.*)

7.2. Les postes de manœuvre. — L'équipement des *postes de manœuvre* détermine la circulation des trains dans les stations d'embranchement, terminus et zones de garages (télécommande des appareils de voie, préparation des itinéraires, signaux) ; il assure en particulier les manœuvres de retournement des trains au terminus et la commande de leur départ ainsi que les garages et *dégarages*.

Le perfectionnement des postes de manœuvre se fait suivant deux tendances, parfois conjointes :

— leur télécommande à partir de postes groupant plusieurs zones de manœuvre ou à partir d'un poste central de ligne ou même de réseau ;

— leur automatisation, soit par l'utilisation de *machines-programmes*, à bandes perforées, assurant le déroulement des manœuvres successives, soit par des ordinateurs ; dans tous les cas, l'automatisme assure la correction des perturbations faibles, l'intervention du personnel étant possible en cas de perturbation grave.

Pour le fonctionnement des systèmes d'automatisation des postes de manœuvre, la connaissance de la *position* des trains est donnée de façon précise par les circuits de voie et relais de la signalisation habituelle. Ces renseignements sont complétés par des systèmes *d'identification des trains* au passage mettant en œuvre une liaison radio entre le train et la voie : appareil émetteur ou *répondeur* sur le train (V. fig. XII-34), *balise* réceptrice ou émettrice-réceptrice sur la voie. L'appareil porté par le train est réglé lors de son départ des garages ou du terminus avec un message codé indiquant le service à assurer sur la ligne.

7.3. Les postes centraux de contrôle de l'exploitation. — Les réseaux de métros modernes, ainsi que les réseaux anciens qui ont pu se moderniser, disposent de postes de commande et de contrôle de l'exploitation soit pour l'ensemble du réseau, soit pour des groupes de lignes (fig. XII-35). Un poste central de commande et de contrôle est équipé pour assurer de façon plus ou moins complète diverses fonctions concourant au maintien de l'exploitation normale et permettant l'intervention du personnel du poste en cas d'incident :

1° Connaissance de la situation en ligne, par un *tableau de contrôle optique* donnant la position des signaux, des appareils de voie, des trains (avec ou sans leur identification) et l'état de l'alimentation en courant de traction.

2° Liaison téléphonique permanente avec les trains ; cette liaison est assurée soit par des courants à haute fréquence passant dans les circuits d'alimentation en courant de traction, soit par un équipement radio (adapté éventuellement à la transmission en tunnel).

3° Télécommande des manœuvres, ou contrôle de leur commande, suivant le système adopté pour l'équipement des postes de manœuvres locaux.

4° Télécommande de l'alimentation en courant de traction des sections de la ligne (sur certains réseaux cette fonction est assurée par un poste spécial de commande de traction, associé au poste d'exploitation ou en liaison directe avec lui).

Un poste central de commande et contrôle de l'exploitation peut être complété par des dispositifs d'automatisation mettant en œuvre un ou plusieurs ordinateurs dans les conditions indiquées ci-après.

7.4. L'automatisation de la marche des trains. — L'automatisation de la marche des trains, telle qu'elle se développe actuellement sur les réseaux les plus modernes, touche deux domaines distincts :

1° *Le pilotage automatique du train* (*Automatic Train Operation : ATO*) simplifie le rôle du conducteur ; ce rôle se trouve alors réduit au seul déclenchement du départ du train dans chaque station.

2° *La commande automatique du mouvement des trains d'une ligne*, qu'il s'agisse de la commande des départs, des manœuvres de terminus, de garages et dégarages ou d'une action continue sur la marche des trains pour assurer la régularité de l'exploitation et la correction des perturbations éventuelles de cette marche.

7.4.1. Le pilotage automatique des trains. — Il permet de n'avoir qu'un seul agent à bord des trains, pour assurer la surveillance des échanges des voyageurs en station et le départ du train (action sur un bouton). Le système de pilotage automatique assure sans intervention humaine :

— une marche entre stations conforme à la marche type prévue ;

— le respect de la signalisation de la ligne ;

— l'arrêt précis en station, quelle que soit la charge du train.

Plusieurs systèmes très différents ont été mis au point pour obtenir ce résultat :

1° Le système appliqué à Paris, sur les lignes en exploitation (depuis 1968 et en voie de généralisation), utilise un câble inducteur posé sur la voie qui matérialise la marche que le train doit assurer :

a) La mise sous tension du câble par du courant alternatif est liée aux indications données par les signaux, la coupure de ce courant déterminant l'arrêt d'urgence.

b) Le câble présente des « redans » dont l'espacement dépend de la vitesse à réaliser par le train en chaque point, ces redans se rapprochent progressivement pour déterminer l'arrêt.

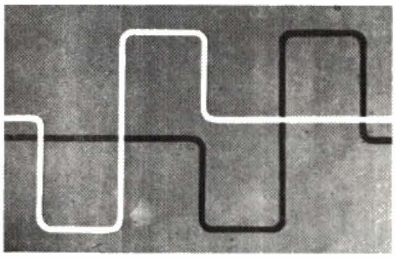


Fig. XII-36

Câble inducteur du système de pilotage automatique de Paris ; tracé du redan ; un des deux câbles représentés est sous tension (*R.A.T.P.*)

Le train est muni de capteurs agissant sur un automatisme qui commande l'accélération et le freinage, de façon à obtenir un passage à intervalles constants au-dessus des redans du câble inducteur (fig. XII-36 et XII-37).

2° Certains systèmes comportent, sur le train, un ordinateur ayant en mémoire la marche à assurer par le train ; dans chaque station une balise inductrice précise la position du train par rapport au point d'arrêt à respecter. Un système indépendant de contrôle des vitesses garantit la sécurité pour déterminer le freinage ou l'arrêt en fonction de la signalisation.

3° D'autres systèmes utilisent des courants inducteurs codés passant par les rails de roulement, ou par des câbles parallèles aux rails, pour déterminer la vitesse du train ; des balises inductrices permettent de définir le point où le courant de traction doit être coupé après le démarrage et servent à contrôler le ralentissement du train jusqu'à son arrêt en station.

7.4.2. La commande automatique du mouvement des trains en ligne. — Elle met en œuvre, soit des *machines-programmes* à bandes perforées pour déterminer le fonctionnement des appareils de voie et de la signalisation dans chaque zone de manœuvre, soit un *calculateur électronique* (central ou décentralisé) qui commande, suivant le programme qui lui a été fourni, la position des appareils de voie et les manœuvres des trains.

Pour obtenir la régularisation intégrale de la marche des trains en ligne, avec correction des perturbations éventuelles, le métro de Paris utilise un calculateur déterminant le départ de chaque train dans chaque station et même la correction de la vitesse moyenne à respecter entre les stations (par l'intermédiaire de la fréquence du courant inducteur de pilotage automatique qui peut prendre plusieurs valeurs).

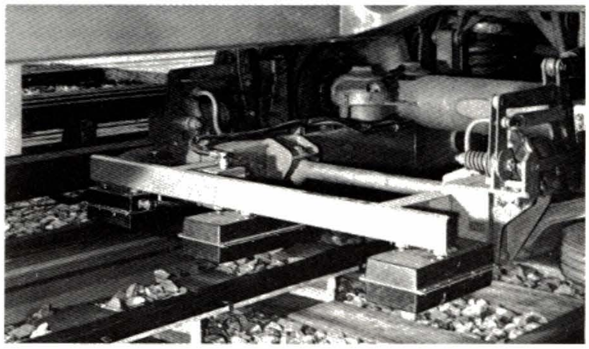


Fig. XII-37 — Entre les rails : bande isolante contenant le câble inducteur ; au-dessus de la bande : boîtier contenant les capteurs qui décèlent les « redans » du câble (*R.A.T.P.*)

8. LES STATIONS

8.1. Dispositions générales. — Les stations ont, le plus souvent, deux quais encadrant les voies, mais d'autres dispositions sont également utilisées, surtout sur les lignes souterraines, pour des raisons constructives :

— voies encadrant un quai central, plus ou moins large, avec des escaliers à chaque extrémité (Berlin, Moscou, Rotterdam, par exemple ; fig. XII-38). ;

— tunnel distinct pour chaque direction avec un quai et une voie (Londres).

À Leningrad, dans certaines stations, le quai est séparé de la voie par une cloison comportant des portes qui s'ouvrent en même temps que celles des trains.

L'organisation des stations des métros présente une grande importance, d'une part, pour la commodité et le confort des voyageurs, d'autre part, pour l'efficacité de la perception des recettes.

Les quais d'une station souterraine sont réunis par des escaliers à une ou plusieurs *salles de contrôle* (ou salles de recettes) où sont opérés la perception du prix de transport et les contrôles d'entrée et de sortie des voyageurs. Assez fréquemment la salle de contrôle est disposée, en mezzanine, au-dessus des quais et immédiatement au-dessous du niveau du sol (V. fig. XII-39). Parfois, elle est aménagée dans un bâtiment construit spécialement sur la voie publique (V. fig. XII-40) ou dans le rez-de-chaussée d'un immeuble.



Fig. XII-38

Station à quai central à Rotterdam (*R.E.T.*)

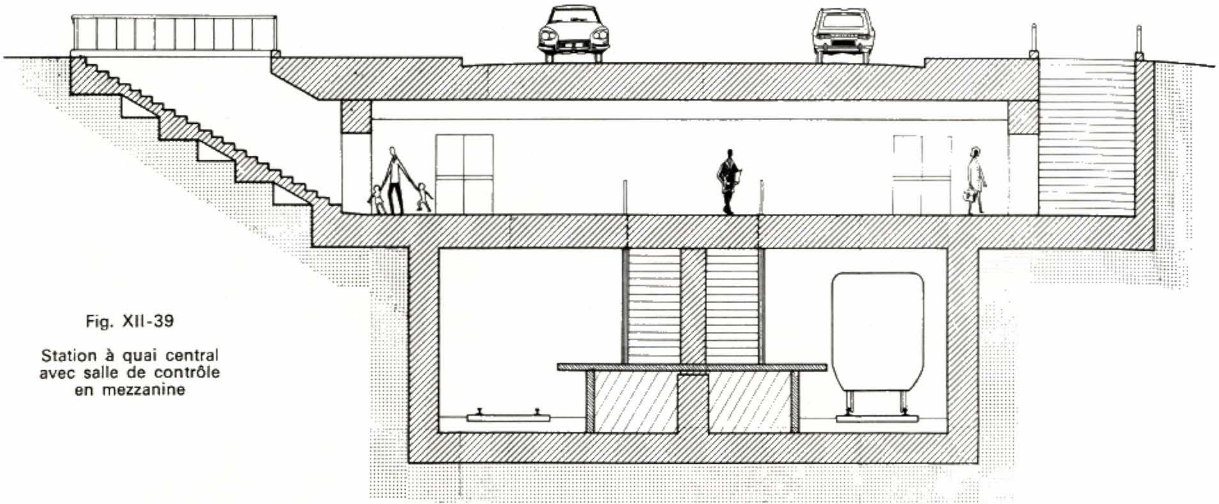


Fig. XII-39

Station à quai central avec salle de contrôle en mezzanine

Fig. XII-40 — Station avec bâtiment sur la voie publique à Berlin (*BVG*)



Les salles de contrôle sont réunies à la voie publique par des *débouchés* multiples. Des couloirs de correspondances réunissent les quais ou les salles de contrôle des stations de lignes qui se croisent.

8.2. Canalisation et circulation des voyageurs. — La circulation des voyageurs entre les salles de contrôle et les quais, et dans les correspondances, est organisée, de façon à éviter les encombrements. Des circulations à sens unique sont aménagées pour les circulations les plus importantes.

L'admission des voyageurs sur les quais, à Paris et sur d'autres réseaux, est interrompue au passage des trains par des *portillons automatiques* (fig. XII-41).

La circulation des voyageurs est facilitée, lorsque les dénivellations à franchir sont importantes (plus de 3 ou 4 m), par des ascenseurs ou des escaliers mécaniques ; ces derniers, qui sont actuellement utilisés le plus fréquemment, en raison de la continuité de leur débit, ont des hauteurs qui vont de quelques mètres à trente ou quarante mètres (une station profonde, comme la station Étoile du réseau express régional à Paris, peut comporter jusqu'à une cinquantaine d'appareils élévateurs ; fig. XII-42).



Fig. XII-41 — Portillon automatique d'accès aux quais (*R.A.T.P.*)



Fig. XII-42 — Escaliers mécaniques d'une station du réseau régional de Paris (*R.A.T.P.*)



Fig. XII-43 — Trottoirs roulants à la station Montparnasse à Paris (*R.A.T.P.*)



Fig. XII-44

Guichet de vente
des billets
et contrôle manuel
d'entrée
(disposition supprimée à
Paris)
(*R.A.T.P.*)



Fig. XII-45

**Distributeurs
automatiques
de titres de transport
(*R.A.T.P.*)**

Fig. XII-46 — Ligne de contrôle d'entrée, avec contrôle manuel des billets (disposition supprimée à Paris) (*R.A.T.P.*)





Fig. XII-47

Tourniquets automatiques d'admission pour billets à codage magnétique (*R.A.T.P.*)



Fig. XII-48

Panneaux lumineux de signalisation (*R.A.T.P.*)



Fig. XII-49

Plan indicateur automatique (*R.A.T.P.*)

Fig. XII-50 — Poste pour la surveillance des voyageurs sur les quais et dans les escaliers mécaniques par téléviseurs (*R.A.T.P.*)



Lorsque des distances de quelques centaines de mètres doivent être franchies horizontalement, dans les correspondances entre les quais, les couloirs peuvent être équipés de trottoirs roulants à bandes continues (V. fig. XII-43). La vitesse de tels appareils est actuellement limitée à 2,5 à 3 km/h; des études sont en cours dans divers pays pour mettre au point des « transporteurs continus » qui, avec des vitesses d'entrée et de sortie de cet ordre, assurent dans leur partie centrale une vitesse trois ou quatre fois supérieure.

8.3. Perception du prix de transport et contrôle des voyageurs. — L'organisation de la perception du prix de transport dans les stations et du contrôle des voyageurs est réalisée de façons très diverses :

— achat préalable par le voyageur d'une carte donnant droit à un nombre de voyages limité, ou non limité, pendant une semaine, un mois, plusieurs mois ;

— achat préalable de billets ou de jetons dont chacun correspond au prix d'un voyage ; cet achat est fait, soit à un guichet disposé en avant d'une *ligne de contrôle d'entrée*, soit à un ensemble de distributeurs automatiques (V. fig. XII-44 et XII-45) ;

— paiement au passage de la ligne de contrôle d'entrée.

La ligne de contrôle d'entrée est constituée :

— soit par des barrières où des agents de l'exploitation vérifient les cartes, annulent ou retirent les billets ou, éventuellement, perçoivent le prix de transport (V. fig. XII-46) ;

— soit par des tourniquets automatiques, ou passages automatiques de formes diverses, qui n'autorisent le passage qu'après l'introduction dans une fente d'une pièce de monnaie (U.R.S.S.), d'un jeton (New York) ou d'un billet (Paris, Londres, Milan) (V. fig. XII-47).

Dans ce dernier cas, le billet porte des indications codées plus ou moins complexes, inscrites, soit par des marques d'encre magnétique ou conductrice, soit par des enregistrements électromagnétiques sur une couche d'oxyde de fer ; ces inscriptions sont lues et interprétées par une *tête lectrice électronique* dont le passage automatique est équipé.

Sur les réseaux à tarif unique, les voyageurs sortent par des portes ou portillons, à sens unique, interdisant toute entrée frauduleuse.

Sur les réseaux à tarif différentiel, où le prix de transport dépend de la longueur du parcours, un contrôle doit être exercé à la sortie du réseau : contrôle manuel ou contrôle par passages automatiques à têtes lectrices de billets codés.

Sur certains réseaux allemands, où la proportion des porteurs de cartes d'abonnement est importante, l'entrée vers les quais se fait librement sans aucun contrôle permanent, les voyageurs démunis de cartes étant invités à acheter un billet à un distributeur automatique ; la fraude est évitée par des contrôles exceptionnels très efficaces assortis d'amendes sévères.

Pour les réseaux à tarification plus complexe, ou ceux dont les voyageurs sont moins disciplinés, l'adoption des passages automatiques de contrôle et des distributeurs automatiques de billets codés permet des économies sensibles de personnel.

8.4. Information et surveillance des voyageurs

8.4.1. Information. — L'information des voyageurs circulant ou stationnant dans les métropolitains est toujours particulièrement soignée en raison des foules importantes auxquelles elle s'adresse.

1° *Sur le plan visuel,* il s'agit de signes extérieurs sur la voie publique, d'indications des noms des stations, du fléchage des sorties, correspondances et accès aux quais (V. fig. XII-48), d'indicateurs lumineux de la destination des trains attendus, de plans de réseaux apposés dans les stations et les voitures (par exemple : plans indicateurs automatiques pour la recherche des itinéraires) (V. fig. XII-49).

2° *Des équipements de sonorisation* sont nécessaires dans les stations et dans les trains, particulièrement pour avertir les voyageurs des modifications ou perturbations du service.

8.4.2. Surveillance des voyageurs. — Une surveillance des voyageurs est nécessaire en certains points des stations où des accidents peuvent survenir (quais et escaliers mécaniques). L'utilisation de la télévision en circuit fermé permet de faire exercer cette surveillance soit par le personnel des trains, pendant la montée et la descente des voyageurs, soit par des agents des stations (V. fig. XII-50).

8.5. Commerce — Distributeurs — Publicité. — L'installation de boutiques et distributeurs automatiques de denrées diverses est faite de façon plus ou moins large suivant les pays ; en dehors de l'obtention d'un revenu supplémentaire, il s'agit pour les exploitants de rendre service aux voyageurs et d'égayer l'ambiance des stations. La publicité, qui doit s'intégrer dans la décoration générale, anime, de la même façon, l'environnement des voyageurs souterrains.

LA ROUTE

GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE PREMIER
HISTORIQUE DE L'AUTOMOBILE

1. QUELQUES DATES

Tout d'abord nous donnerons quelques dates importantes pour rappeler quelles ont été les sources d'énergie utilisées et quelle a été l'évolution de l'automobile.

1.1. Sources d'énergie

1615 — Salomon de Caus envisage l'utilisation de la pression de la vapeur d'eau comme force motrice.

1700 — Denis Papin réalise la première chaudière à vapeur.

1801 — Lebon utilise le gaz d'éclairage pour alimenter un moteur dont le mélange explosif est enflammé par une étincelle électrique.

1859 — Le pétrole est découvert en quantités notables en Pennsylvanie et le premier puits est foré par Drake.

1860 — Planté construit le premier accumulateur électrique.

1860 — Lenoir prend un brevet pour un moteur à gaz, brevet complété par une addition relative à l'utilisation de l'essence, de l'huile de schiste et de tout autre hydrocarbure.

1885 — Delamare-Deboutteville, puis Daimler, utilisent le pétrole et l'essence pour leurs moteurs.

Qu'il s'agisse de véhicules munis de moteur à allumage commandé, dit à explosion, à quatre temps ou à deux temps, ou de moteur à allumage spontané, dit Diesel, le pétrole et ses dérivés représentent la source d'énergie la plus utilisée actuellement mais cela n'exclut pas l'emploi d'autres sources telles que l'électricité, certains gaz et la vapeur d'eau.

1.2. Automobiles

1769 — L'ingénieur militaire français Cugnot construit le premier véhicule automobile dénommé le « fardier ». Ce véhicules à trois roues, dont la première est directrice et motrice, utilise la vapeur d'eau comme source d'énergie (moteur à deux cylindres). Il se trouve actuellement au Conservatoire des Arts et Métiers et a été choisi comme emblème par la Société des ingénieurs de l'automobile (fig. I-1).

1816 — La direction à essieu brisé est inventée par Lankensperger.

1828 — On crée en Grande-Bretagne des services réguliers de diligences automobiles à vapeur. Cet essai est interrompu par le *Locomotiv act* qui prétend imposer une réglementation trop sévère.

1828 — Pecqueur invente le différentiel.

1846 — Le pneumatique est inventé par Thomson.

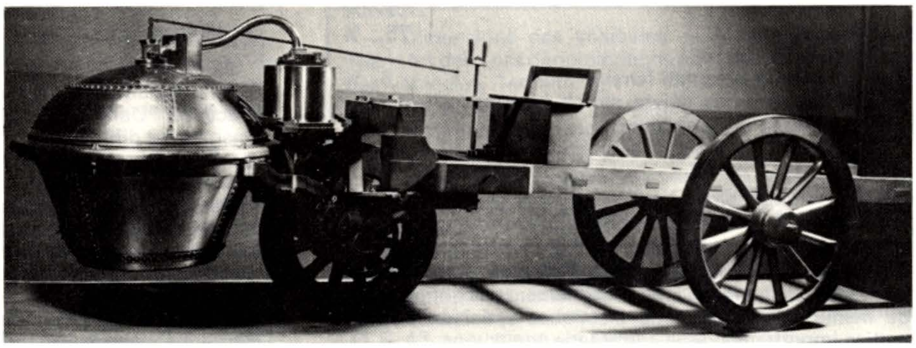
1863 — Lenoir construit une voiture avec moteur à explosion alimenté au gaz.

1872 — Amédée Bollée construit « l'Obéissante », break à douze places avec moteur à vapeur d'eau.

1873 — Les frères Bollée mettent au point la direction par deux roues pivotant aux extrémités d'un essieu fixe. Ils améliorent transmission et graissage et construisent un véhicule à vapeur d'eau qui parcourt le trajet Le Mans — Paris.

1881 — Raffard construit un tricycle à accumulateurs.

1883 — De Dion-Bouton construit un tricycle à vapeur d'eau. La même année Delamare-Deboutteville crée un nouveau type de « voiture sans chevaux » à moteur à gaz puis à moteur à pétrole (1885).



« Fardier » de Cugnot
(*Goldner*)

1886 — Benz construit une voiturette légère (300 kg) roulant à 20 km/h au maximum avec moteur horizontal monté à l'arrière du véhicule.

1887 — Daimler prend un brevet pour voiture automobile.

1890 — Peugeot construit une série de voitures avec moteurs Daimler que fabrique Panhard et Levassor.

1891 — Le pneu démontable est réalisé par Michelin.

1894 — Premier salon avec véhicules automobiles. La course Paris-Rouen (126 km, quinze concurrents, trois véhicules à vapeur, douze à pétrole) est gagnée par De Dion-Bouton à la vitesse moyenne de 22 km/h.

1895 — Course Paris-Bordeaux-Paris (1200 km) gagnée par Levassor à la vitesse moyenne de 24,6 km/h.

Environ cinq cents voitures automobiles circulent alors en France.

1897 — Premier concours de poids lourds.

1898 — Pellegrin équipe une voiture avec un moteur type Diesel.

1899 — Jenatzy, sur voiture électrique, dépasse pour la première fois 100 km/h.

1899 — La prise directe dans les boîtes de vitesses est réalisée par Renault qui prend un brevet.

1900 — L'exposition universelle comporte une section automobile.

1903 — Boudeville fabrique une magnéto haute tension.

1904 — Le freinage sur roues avant, indépendant de la direction, est utilisé.

1910 — Un frein à action différentielle est mis au point par Perrot.

1922 — Édition d'un code de la route.

1955-1957 — À signaler la construction de voitures à turbines expérimentales.

1963 — Voitures avec moteur rotatif N.S.U.-Wankel.

1.3. Conclusions. — Au début du XXe siècle le véhicule automobile est véritablement créé.

Ensuite, les progrès obtenus dans l'élaboration des métaux et autres matières (caoutchouc et plastiques, par exemple) ont permis d'apporter des perfectionnements innombrables et continus à tous les éléments essentiels des véhicules: moteurs, transmission, freins, suspension, châssis, carrosserie, pneumatiques, etc.

La tenue de route s'améliore sans cesse, permettant d'atteindre des vitesses croissantes. Les questions relatives à la sécurité des véhicules et à la protection individuelle sont étudiées avec la plus grande attention.

Que peut-on attendre de l'avenir? Laissant de côté des perfectionnements inattendus toujours possibles, on peut prévoir des moteurs plus légers et moins encombrants, des carrosseries plus souples et plus confortables en raison de l'emploi de matières plastiques pour certaines parties, une simplification de la conduite grâce, notamment, à la généralisation du changement de vitesses automatique.

2. CONSTRUCTION DE SÉRIE

2.1. Matières premières utilisées. — La variété des matières nécessaires à la construction des véhicules automobiles est très grande. Le tableau suivant n'en donne qu'un aperçu; les pourcentages indiqués ne correspondent qu'à des valeurs approximatives car ils varient quelque peu d'un véhicule à l'autre.

Métaux ferreux (Acier, fer, fonte)	75 %
Métaux ou alliages non ferreux (Aluminium, zinc, cuivre, plomb, bronze)	5 %
Lubrifiants et liquides divers	5 %
Caoutchouc	5 %
Verre	2,5 %
Plastiques et divers	2,5 %
Garnissages et isolants contre le bruit	5 %

Il est certain que l'utilisation d'alliages ou de produits nouveaux pourra faire varier sensiblement ces pourcentages, de même que l'emploi de plastiques spéciaux pour des parties importantes de la carrosserie.

2.2. Fabrication des différentes pièces — Assemblage et montage. — La demande en voitures automobiles continue à croître dans tous les pays du monde. L'importance du parc mondial (qui dépasse deux cent cinquante millions de véhicules) s'explique par le fait que la construction des véhicules et la fabrication des pièces composantes ont été réalisées de plus en plus rapidement pour répondre précisément à une demande croissante que pouvaient satisfaire les prix de vente.

De nombreuses usines fabriquent plus d'un million de voitures par an, ce qui représente plus de quatre mille véhicules par journée de travail.

Les problèmes essentiels à résoudre sont d'abord l'usinage des pièces composantes et leur manutention en cours d'usinage et après usinage, ensuite le montage des éléments composants pour constituer les pièces puis les véhicules.

Usinage. — Tout d'abord furent utilisées des machines-outils, chacune pour un seul type de travail, la pièce à fabriquer étant transportée manuellement d'une machine à l'autre. Puis, avec certaines machines il fut possible d'exécuter plusieurs opérations d'usinage en partant de la même prise de pièce. Ensuite des machines dites *spéciales à poste fixe* furent utilisées, pour certaines opérations du moins, et plusieurs unités d'usinage placées sur une même table permirent des opérations différentes en vue de réaliser une pièce déterminée.

L'usinage à la chaîne apparut lorsque les machines-outils furent placées dans l'ordre de leurs interventions mais un transport était nécessaire pour passer de l'une à l'autre. L'automatisation fut réalisée lorsque les différents postes qu'il fallait alimenter furent reliés à la machine qui les précédait dans la chaîne par des dispositifs mécaniques de manutention. Ainsi les pièces en cours de fabrication étaient transportées d'une unité d'usinage à l'autre. Ce furent les premières *machines transfert*.

Actuellement, unités d'usinage et unités de manutention sont commandées automatiquement de même que les éléments qui concourent au contrôle et au nettoyage.

Cette évolution des fabrications a permis de réaliser une économie de main-d'œuvre croissante en même temps que les surfaces des ateliers nécessaires pouvaient être réduites. De plus, l'usinage automatique a entraîné une amélioration des pièces fabriquées par suite, d'une part, de la précision qu'il apporte et, d'autre part, de la qualité qu'il exige pour les matières premières utilisées.

Le montage à la chaîne des éléments des véhicules, comme aussi des différentes parties de la carrosserie, présente encore des difficultés pour ce qui concerne la mise en œuvre de l'automatisation. Il en est de même quant aux essais nécessaires en cours de fabrication ou de montage. À signaler, cependant, deux réalisations Renault intéressantes:

— dispositif d'insertion des sièges de soupapes dans les culasses, qui réduit considérablement les rebuts;

— essais de moteurs effectués sur des bancs montés sur une plate-forme tournante de douze mètres de diamètre.

De plus, dans le montage de la carrosserie, si les travaux manuels demeurent fréquents, on cherche aussi à en réduire le nombre (par exemple, à l'aide d'une chaîne de soudures des planchers.

3. NORMALISATION

La nécessité de normaliser s'est imposée à mesure que se développaient les techniques dans toutes les branches d'activité. Dans les équipements pour automobiles on imagine les difficultés que présenteraient pour les constructeurs de véhicules, ou pour les garagistes, des bougies ou des soupapes de caractéristiques dimensionnelles inutilement variées, de même que des types trop nombreux d'équipements ou d'éléments de construction (boulons, vis, écrous) ou même des systèmes de fixation différents les uns des autres pour un même appareil. Il convenait donc de préciser les caractéristiques des pièces susceptibles d'être utilisées couramment et d'en limiter le nombre par catégorie. Cela a conduit à l'établissement de normes (V. t. 1 Préliminaires).

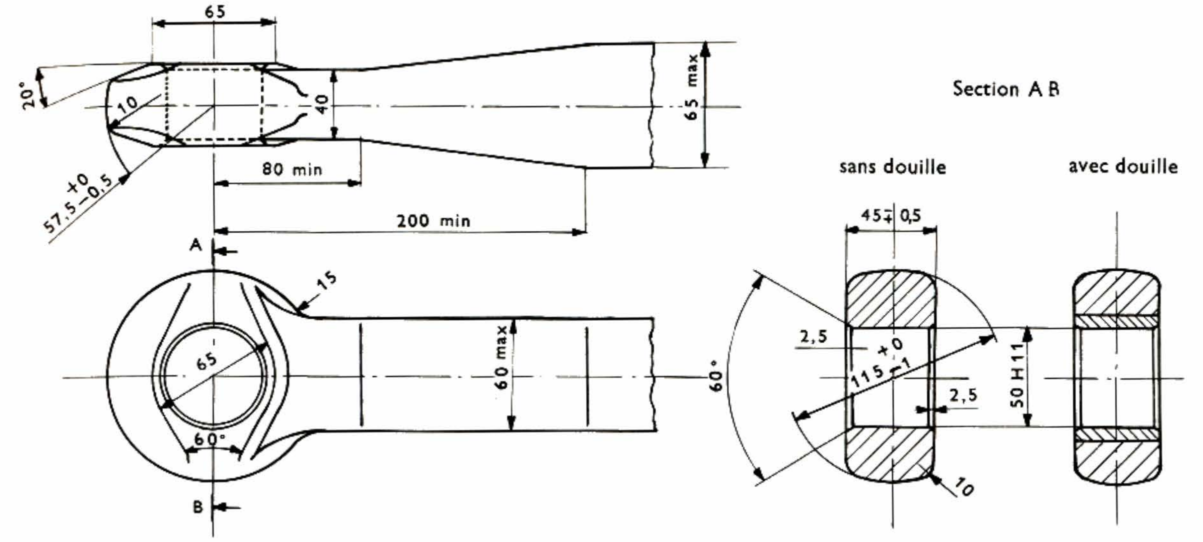


Fig. I-2

3.1. Normalisation nationale. Bureau des normes de l'automobile (B.N.A.). — Dans la plupart des cas, c'est avec l'aide de bureaux de normalisation que l'AFNOR remplit sa mission essentielle : établir des normes intéressant la plupart des activités.

Le Bureau des normes de l'automobile (157-159, rue Lecourbe - Paris 15e) est un service de l'U.T.A.C., Union technique de l'automobile et du cycle (même adresse) organisme qui dispose de plusieurs laboratoires de contrôle et d'essais à Montlhéry. Le B.N.A. est en rapport fréquent avec une dizaine d'autres bureaux analogues et plus particulièrement avec le Comité de normalisation de la mécanique et de la transformation des métaux (C.N.M.).

Les normes de l'automobile appartiennent à la classe *R* ; la plupart d'entre elles sont enregistrées : la procédure correspondante, qui consiste en enquêtes simples, est plus rapide que pour les normes homologuées (celles-ci nécessitent une enquête publique et une approbation ministérielle). Comme les techniques qui concernent l'automobile évoluent rapidement il a semblé préférable de s'en tenir à l'enregistrement.

Un album B.N.A. est publié à intervalles réguliers ; il comprend des normes R mais aussi quelques normes de la mécanique (normes E) présentant un intérêt certain pour la construction automobile.

Les normes de l'automobile s'appliquent à la plupart des pièces essentielles des véhicules : voitures particulières et caravanes, véhicules utilitaires, camions, tracteurs, remorques et semi-remorques.

Les croquis des normes suivantes permettent de saisir leur intérêt.

La norme NF R 411-06 (fig. I-2) concerne l'anneau d'attelage cylindrique de 50 mm qui permet de relier un camion avec une remorque d'une masse supérieure à 3,5 t. Cet anneau est solidaire du timon d'attelage de la remorque. Ses caractéristiques dimensionnelles sont indiquées, de même que les angles de débattement que doit permettre le dispositif d'attelage du côté camion.

La norme NF R 434-06 (fig. I-3) est relative à la prise de courant à sept contacts utilisée pour des remorques de plus de 3,5 t et des semi-remorques. Elle présente l'ensemble fiche et socle et les caractéristiques dimensionnelles de chacune de ces deux parties.

3.2. Normalisation internationale. — L'organisation internationale de normalisation (*International Organization for standardization*) a pris la suite, en 1947, d'un organisme du même genre créé en 1919. Son secrétariat central est à Genève ; 1, rue Varembé.

L'ISO crée des comités techniques (ISO T.C., les deux dernières lettres signifiant *Technical Committee*) chargés d'établir des documents appelés *Recommandations ISO*.

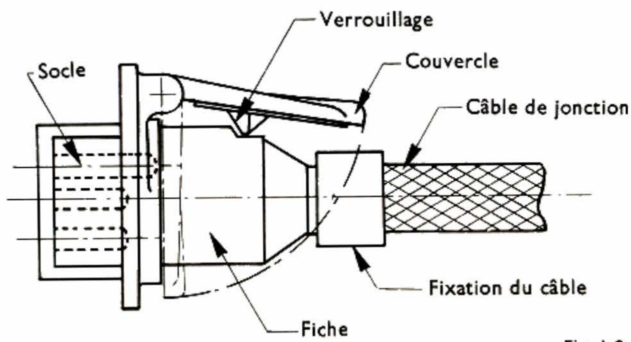


Fig. I-3

Parmi les premiers comités techniques importants créés citons : ISO T.C. 1 : filetages, T.C. 5 : tuyauteries et raccords, T.C. 11 : chaudières, T.C. 17 : acier, T.C. 22 : automobiles, T.C. 23 : machines et tracteurs agricoles, T.C. 31 : pneumatiques, T.C. 38 : textiles, T.C. 39 : machines-outils, T.C. 44 : soudure, T.C. 94 : sécurité individuelle (en particulier ceintures de sécurité).

Le secrétariat d'un comité technique est confié à un comité membre. Le comité membre français, l'AFNOR, a la charge des secrétariats suivants parmi ceux que nous avons cités : ISO T.C. 22, ISO T.C. 23, ISO T.C. 39, ISO T.C. 44. Le secrétariat d'un comité technique organise les travaux à exécuter et prépare les documents ISO avec l'aide des comités membres participants. Les bureaux de normalisation et, plus particulièrement ceux des pays qui détiennent le secrétariat, ont un rôle important dans ces travaux.

L'ISO peut avoir des liaisons avec d'autres organismes internationaux par l'intermédiaire de ses comités techniques qui peuvent aussi avoir des liaisons entre eux. Parmi les principales recommandations ISO préparées par le comité 22 (certaines sont en cours de révision) citons les titres suivants :

— Dimensions des véhicules — Masse des véhicules (dans les deux cas dénominations et définitions) — Freinage des véhicules. Terminologie — Liaisons mécaniques entre camions et remorques, tracteurs et semi-remorques — Pivot d'attelage pour semi-remorques — Attelage à boule pour caravanes et remorques légères.

— Liaisons électriques entre véhicules tracteurs et véhicules remorqués, dans le cas d'une alimentation sous 24 V et dans le cas d'une alimentation sous 12 V — Feux d'éclairage et de signalisation pour les véhicules automobiles et leurs remorques — Avertisseurs sonores — Normes acoustiques et spécifications techniques — Essais des moteurs — Mesure des bruits émis par les véhicules automobiles (T.C. 43, acoustique, en liaison avec T.C. 22).

— Ancrages des ceintures de sécurité. — Ceintures de sécurité pour automobilistes — (T.C. 94 en liaison avec T.C. 22).

Certaines de ces études ont été effectuées, soit à la demande, soit en accord avec le groupe de travail de la construction des véhicules (*Working Party* 29, en abrégé *W.P.* 29). Plusieurs d'entre elles sont particulièrement importantes. À titre d'exemple, nous citerons celle concernant les liaisons de toutes catégories entre véhicules tracteurs et véhicules remorqués (le but est de permettre d'atteler n'importe quel camion à n'importe quelle remorque) et celle consacrée aux feux d'éclairage et de signalisation qui contribuent à la sécurité des véhicules.

En ce qui concerne les essais de moteur, le rôle de l'ISO a été particulièrement important. Rappelons que ces essais ont pour but de déterminer la puissance nette d'un moteur et sa puissance brute. Dans le premier cas, le moteur doit être équipé de la même manière que lorsqu'il se trouve en place sur le véhicule auquel il est destiné. L'ISO a cherché à faire admettre une méthode de mesure pouvant remplacer les méthodes décrites dans les normes de plusieurs pays (S.A.E. pour les États-Unis d'Amérique, D.I.N. pour la République fédérale allemande ; C.U.N.A. pour l'Italie, etc.), méthodes qui nécessitaient des équipements différents et ne conduisaient pas aux mêmes résultats pour un même moteur.

De plus, l'ISO exerce une action directe sur la normalisation nationale car les comités membres de l'ISO qui ont participé à la rédaction d'une recommandation utilisent fréquemment celle-ci pour la transformer en normes nationales. C'est en particulier le cas de celle qui est représentée sur la figure I-2.

4. L'AUTOMOBILE ET LA LOI

4.1. Plan du code de la route. — Si le législateur et les administrations responsables ont tout d'abord rédigé des dispositions qui avaient pour but de réglementer une circulation sans cesse plus difficile (accroissement du nombre, de la masse, de la longueur et de la vitesse des véhicules), rapidement ils imposèrent aussi des prescriptions relatives à la construction des véhicules. Ces dispositions ont surtout pour but d'accroître la sécurité des passagers d'un véhicule déterminé et, en même temps, pour les autres usagers de la route, de limiter les dangers que peut leur faire courir ledit véhicule.

Il convient d'observer que les textes relatifs à la construction des véhicules imposent seulement d'obtenir certains résultats lors d'essais déterminés, sans préciser, généralement, les détails de construction.

Le code de la route actuellement publié comprend trois tomes :

Tome I (1970) : Parties législatives et réglementaires (lois et décrets) ;
Tome II (1969) : Textes d'application (décrets, arrêtés et circulaires non codifiées) ;
Tome III (1970) : Cahiers des charges ; arrêtés divers.

De nombreux suppléments ont été publiés ; ils se rattachent en général aux tomes II et III.

4.2. Textes principaux présentés dans les trois tomes. — Le tome I traite des prescriptions imposées à tous les usagers de la route (piétons, conducteurs d'animaux, cyclistes, cyclomotoristes, motocyclistes, conducteurs de véhicules agricoles et de travaux publics, automobilistes).

Ce tome comprend huit titres. Le titre I est à caractère général. Le titre II s'applique plus spécialement à l'automobile. Les titres suivants concernent les autres usagers de la route (le titre VIII regroupe des dispositions transitoires). Le titre II fixe les règles administratives qui s'appliquent soit aux constructeurs de véhicules, soit à leurs utilisateurs : réception et homologation, immatriculation (cartes grises), visites techniques, permis de conduire, contrôle routier.

Les dispositions relatives aux permis de conduire s'appliquent à tous les conducteurs de véhicules, explicitement mentionnés dans le tableau suivant :

Permis	Véhicules
A	Motocycles avec ou sans side-car
A_1	Vélomoteurs avec ou sans side-car — Tricycles et quadricycles à moteurs
B	Véhicules automobiles de masse totale en charge inférieure à 3 500 kg, avec remorque éventuelle de masse totale en charge de 750 kg et transportant au maximum huit personnes,
C	Véhicules automobiles affectés au transport de marchandises ; la masse totale en charge peut excéder 3 500 kg avec remorque éventuelle de masse totale en charge de 750 kg,
D	Véhicules pour transports en commun (plus de huit personnes),
E	Véhicules (catégories B, C, D) avec remorque de masse totale en charge de 750 kg,
F	Catégories A, A_1 ou B aménagées pour infirmes.

Le permis de conduire ne peut être accordé qu'après un examen qui comporte en premier lieu une interrogation sur le code de la route. Des épreuves plus importantes sont imposées aux personnes qui désirent enseigner la conduite des véhicules à moteur dans des établissements spécialisés.

Le deuxième tome rassemble différents arrêtés qui traitent de certains sujets mentionnés dans le premier tome et développent des points essentiels.

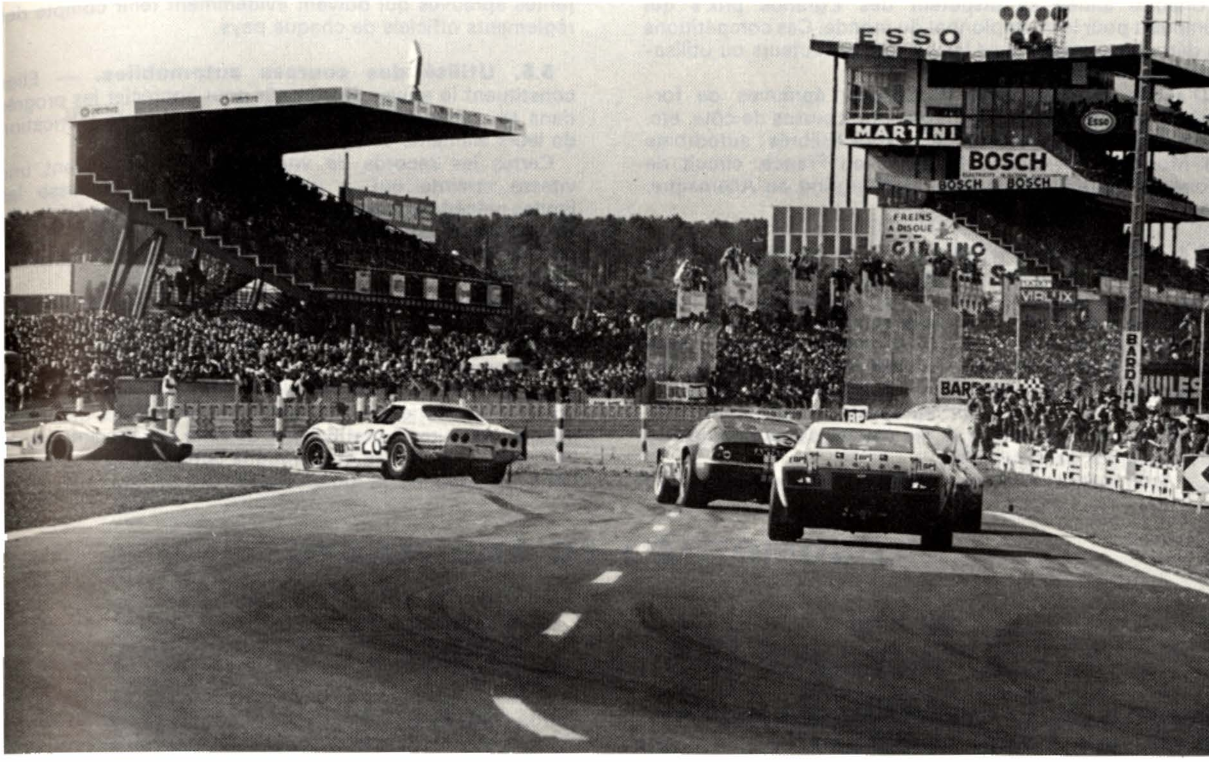
Le troisième tome concerne des dispositions généralement détaillées et relatives à la construction des véhicules et comprend les chapitres suivants : aménagement des véhicules, éclairage et signalisation, organes de manœuvre de direction et de visibilité, organes moteurs, plaques et inscriptions.

Les documents supplémentaires sont relatifs à des sujets ayant été traités par la Division des transports de la commission économique pour l'Europe (groupe de travail de la construction des véhicules dit *Working Party* n° 29). Par exemple, le supplément numéro 1 du tome III présente un arrêté du 30 juin 1970 relatif aux émissions de gaz polluants par les moteurs à essence des véhicules. Le supplément numéro 2 (arrêté du 20 octobre 1970) est relatif à l'équipement des véhicules automobiles en ceintures de sécurité et en ancrages pour ceintures de sécurité.

4.3. Réglementation internationale. — De nombreux arrêtés du code de la route français font allusion à l'accord de Genève du 20 mars 1958 « concernant les prescriptions uniformes relatives à l'homologation des véhicules ». Cet accord est un complément de la convention internationale de Genève de 1949. Son importance doit être précisée.

Les règlements internationaux sont préparés par le groupe de travail W.P. 29 que nous avons cité précédemment. Cet organisme est composé de délégués gouvernementaux qui ont seuls qualité pour donner, au nom de leur gouvernement, leur accord sur un texte discuté au cours de réunions régulièrement tenues. Il comprend aussi des organismes qui participent aux travaux du W.P. 29 à titre consultatif : ISO, Bureau permanent international des constructeurs d'automobiles (*B.P.I.C.A.*), Groupe de travail de Bruxelles (*G.T.B.* ; lieu de sa création) qui intervient à propos des questions concernant les feux d'éclairage et de signalisation, Comité de liaison des équipements pour automobiles (*C.L.E.P.A.*), etc.

Lorsqu'un règlement est accepté en réunion du W.P. 29, il est présenté à l'O.N.U. par la Division des transports de la Commission économique pour l'Europe (C.E.E. — Genève) avec la signature d'au moins deux gouvernements décidés à adopter les dispositions présentées dans leur réglementation nationale. D'autres gouvernements, fréquemment une large majorité, font connaître ensuite officiellement leur accord confirmant ainsi leur approbation en séance. Il en résulte progressivement une harmonisation des réglementations de tous les pays. Certes des difficultés subsistent encore ; elles sont d'ailleurs souvent résolues par des accords particuliers ou provisoires mais les résultats pratiques déjà obtenus ne sont pas discutables.



Circuit du Mans (*J. Pavlovsky-Rapho*)

Le code de la route français, en particulier, tient compte de plus en plus des règlements internationaux : les arrêtés relatifs à l'éclairage et à la signalisation, aux niveaux de bruit, au freinage, à la pollution, à certains aménagements intérieurs, aux ceintures de sécurité et à leurs ancrages, etc., sont inspirés complètement ou presque des règlements internationaux.

La plupart des différences (généralement secondaires) qui peuvent exister du point de vue réglementaire entre des véhicules utilisés normalement dans des pays distincts sont presque toujours admises lorsqu'il s'agit de tourisme, c'est-à-dire d'un séjour momentané dans un pays différent du pays d'origine. Mais un véhicule de provenance étrangère dont l'utilisateur entend se servir en permanence sur un autre territoire doit être adapté au code de la route du pays où il sera utilisé. Cette adaptation deviendra de plus en plus facile en raison des remarques qui précèdent.

Une commission de la Communauté économique européenne (C.E.E. ou marché commun) chargée d'éliminer les entraves aux échanges entre les six pays peut être aussi à l'origine de règlements internationaux concernant l'automobile. Les textes « marché commun » sont donc en général des règlements O.N.U. adoptés, soit avec de légères modifications, soit sans aucune transformation. Certaines questions, plus spécialement communes aux pays membres de cette communauté, ont pu donner lieu parfois à des règlements particuliers.

5. L'AUTOMOBILE ET LE SPORT

Les courses automobiles sont suivies de près par de nombreux utilisateurs de véhicules. D'autres, aussi, mettent en doute leur utilité, considérant surtout les risques d'accidents graves présentés par ce sport.

5.1. Les règlements. — Le code de la route consacre de nombreuses pages aux courses automobiles (Tome II surtout, pages 103 à 155). Il définit les types de course et les circuits qui peuvent être utilisés.

Il existe des épreuves dites de régularité et d'endurance et des épreuves dites de classement. Ces dernières peuvent être :

a) les épreuves de vitesse autres que les épreuves de vitesse en circuit fermé ;

b) les courses de côte ;

c) les épreuves à moyenne spéciale chronométrée (exemple : vitesse obtenue avec une cylindrée limitée) ;

d) les épreuves de maniabilité ;

e) les compétitions de vitesse en circuit fermé.

Chaque type d'épreuve fait l'objet de dispositions particulières.

Un arrêté (14 novembre 1967) porte « réglementation technique des compétitions automobiles et des compétitions de véhicules à deux roues et tricycles à moteur ». Il définit en particulier les circuits et leurs règles d'aménagement. Les circuits dits « normaux » peuvent être utilisés pour des compétitions de vitesse avec toutes les catégories de véhicule ; les circuits spéciaux ne peuvent être utilisés en course que par des véhicules « dont aucun, par sa nature, n'excède une vitesse supérieure à 200 km/h ». Pour les courses de côte, les départs doivent être échelonnés et en aucun point le profil de la route ne doit permettre de réaliser une vitesse supérieure à 150 km/h.

Les compétitions de vitesse en circuit fermé ne peuvent se disputer que sur des circuits homologués, soit par le ministre de l'Intérieur, soit par le préfet.

Des polices d'assurance spéciales doivent être souscrites pour couvrir la responsabilité civile des organisateurs et des concurrents en cas d'accident, d'incendie ou d'explosion au cours de la manifestation sportive.

5.2. Les véhicules. — Les voitures dites de course — sous-entendu : de vitesse — disposent non seulement de moteurs puissants mais aussi de perfectionnements divers apportés à la transmission, au freinage et à tous les moyens d'équipement. Seule la carrosserie est simplifiée à l'extrême. Les jantes sont élargies au maximum pour accroître la tenue de route. Les conducteurs doivent utiliser des casques spéciaux, des ceintures de sécurité spéciales et des dispositifs de protection pour les jambes.

5.3. Les grands prix et autres courses. — Les compétitions les plus impressionnantes sont celles dites de formule 1 (courses de vitesse généralement en circuits fermés) auxquelles participent les voitures les plus puissantes et les conducteurs les plus habiles.

Chaque année se disputent des « grands prix » qui comptent pour le championnat du monde. Ces compétitions se déroulent surtout dans les pays constructeurs ou utilisateurs importants de véhicules.

D'autres épreuves sont fréquentes : épreuves de formule 2, rallyes, épreuves de régularité, courses de côte, etc.

Un certain nombre de circuits, sont calibrés : autodrome de Montlhéry et circuit du Mans en France, circuit de Monaco, Targa Florio en Italie, Nurburgring en Allemagne, etc.

5.4. Organisation générale. — Les automobiles-clubs des différents pays se sont groupés et ont constitué, en 1946, la Fédération internationale automobile (8, place de la Concorde, Paris) à laquelle se rattache la Fédération française des sports automobiles (même adresse) ; cette fédération a pour mission, en particulier, de délivrer les licences que doivent obtenir les conducteurs de véhicules qui désirent participer aux épreuves réglementées. Elle choisit les chronométreurs et les commissaires chargés de faire appliquer les règlements.

Un code spécial indique les règles particulières aux différentes épreuves qui doivent évidemment tenir compte des règlements officiels de chaque pays.

5.5. Utilité des courses automobiles. — Elles constituent le moyen le plus sûr pour apprécier les progrès dans la construction des véhicules et dans la fabrication de leurs éléments et équipements.

Certes les records de vitesse mesurés indiquent une vitesse atteinte qui, à un instant donné, dépasse les limites précédemment connues et mettent ainsi en évidence, sur un point précis, un progrès réalisé, mais les courses automobiles apportent d'autres renseignements, nombreux et essentiels.

Les observations sur le comportement de tous les équipements : freinage, allumage, carburation, pneumatiques soumis à des actions d'une intensité et, parfois, d'une durée exceptionnelles permettent d'apprécier les avantages et inconvénients de telle ou telle fabrication. On peut ainsi orienter ou réorienter les recherches et études des ingénieurs. Les voitures particulières de série bénéficient, lors de leur construction, des observations faites lors des compétitions automobiles de toutes sortes.

CHAPITRE II

DYNAMIQUE DE L'AUTOMOBILE

Avant de décrire les divers organes de l'automobile, nous allons étudier le mouvement du véhicule soumis à des forces motrices et à des forces résistantes. Nous examinerons successivement l'action du couple moteur sur l'essieu dit moteur (notamment la poussée et la réaction qui sont engendrées simultanément), le rôle de la liaison roue-sol réalisée par l'intermédiaire des pneumatiques, l'influence de la résistance au roulement et l'action de l'air sur toute la surface du véhicule. Nous verrons également comment varie la tenue de route suivant les circonstances et nous terminerons ce chapitre par une étude sommaire de la sécurité individuelle.

1. POUSSÉE ET RÉACTION

Le déplacement du véhicule est provoqué par l'action des roues motrices qui transmettent une poussée vers l'avant à l'essieu moteur, entraînant ainsi la voiture. Cependant, lorsque le pignon conique (solidaire de la partie motrice) tend à monter sur la couronne immobile (solidaire de la partie entraînée), il se produit une réaction du pont arrière qui tend à se cabrer (l'ensemble du véhicule tend à pivoter autour d'un axe passant par les points de contact des roues avant et du sol). Pour cette raison, lorsque la poussée est communiquée au véhicule, il faut absorber le couple de cabrage qui traduit la réaction du pont arrière sur la transmission. Les organes qui relient l'essieu moteur au véhicule ont donc été conçus pour transmettre la poussée et pour supporter la réaction. On utilise soit des ressorts seuls, soit le tube carter central seul pour assumer les deux fonctions. Dans d'autres cas, le véhicule est équipé de ressorts pour la transmission de la poussée et ce sont des bielles ou le tube carter central qui permettent d'absorber la réaction.

1.1. Ressorts seuls. — Ils sont directement fixés sur le châssis (*A*) pour assurer la poussée et sont reliés à l'essieu par des patins non oscillants (bride rigide) (fig. II-1).

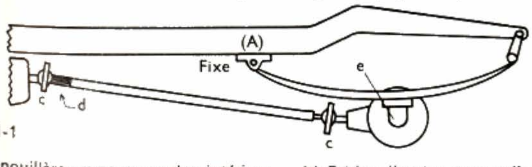


Fig. II-1

a) Genouillères avec un cardan intérieur. — b) Brides d'essieu avec palier oscillant. — c) Cardans. — d) Ajustages coulissants. — e) Bride d'essieu rigide

1.2. Tube carter central seul. — À l'avant et à l'arrière des ressorts montés sur patins oscillants sont fixés au châssis par l'intermédiaire de jumelles. L'arbre de transmission ne comporte qu'un joint de cardan. Le carter de pont est prolongé par un tube central fixé par une rotule à l'arrière de la boîte de vitesses (fig. II-2). Ce système rationnel est le plus fréquemment employé.

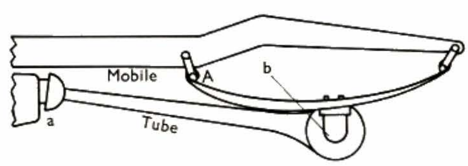


Fig. II-2

1.3. Ressorts avec bielles ou tube central. — Les ressorts sont directement fixés sur les châssis et les patins de fixation à l'essieu sont oscillants. Le tube central du pont peut se prolonger par un tube carter qui entoure l'arbre de transmission. Dans le cas où l'on emploie une bielle (qui joue le rôle d'une jambe de force) celle-ci est fixée de manière rigide au pont arrière et par l'intermédiaire d'une biellette au châssis (fig. II-3).

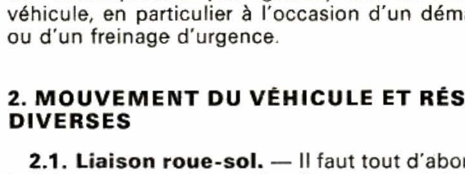


Fig. II-3

Quel que soit le système utilisé, les points de liaison doivent être fréquemment vérifiés. Tout desserrage en ces points peut provoquer des chocs désagréables (sans parler des conséquences plus graves) lors du mouvement du véhicule, en particulier à l'occasion d'un démarrage brutal ou d'un freinage d'urgence.

2. MOUVEMENT DU VÉHICULE ET RÉSISTANCES DIVERSES

2.1. Liaison roue-sol. — Il faut tout d'abord considérer la liaison pneumatique-sol, cela nous conduit à préciser les principales caractéristiques des pneumatiques et l'adhérence.

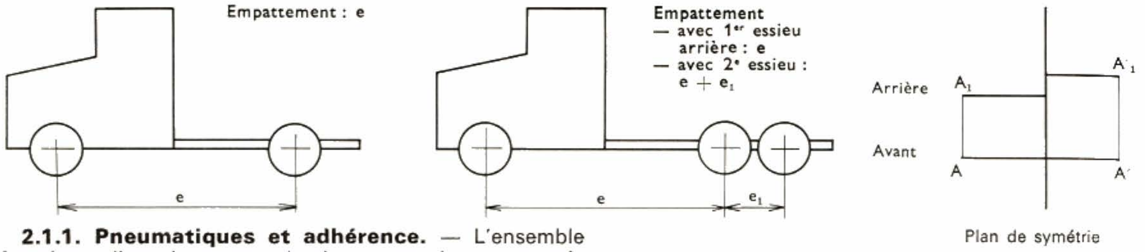


Fig. II-5

2.1.1. Pneumatiques et adhérence. — L'ensemble formé par l'enveloppe souple du pneumatique et par la jante constitue un volume fermé. L'enveloppe comprend des tringles (qui permettent son ancrage sur la jante), une carcasse et une bande de roulement en caoutchouc (V. t. 4, La route, chap. 19). Sans entrer dans le détail, rappelons que les carcasses sont constituées par des plis successifs formés de fils textiles ou métalliques enrobés de caoutchouc; elles sont dites radiales si la direction générale des fils des plis est perpendiculaire au plan médian de la roue et elles sont dites croisées dans les autres cas (les fils et, par conséquent, les plis font alors entre eux un angle généralement inférieur à 45°). C'est le contact sol-caoutchouc qui assure l'adhérence et limite ou évite le glissement lorsque le véhicule tend à se déplacer par roulement. L'adhérence peut être définie sommairement (car il s'agit d'un phénomène complexe) comme l'effort minimal qui permettrait de déplacer un véhicule dont les roues seraient bloquées. C'est alors une résistance au glissement. Si P est la charge qui s'exerce sur une roue et si Pf_g est l'effort défini ci-dessus, l'adhérence est égale à :

$$A = Pf_g$$

et f_g est le coefficient d'adhérence (de frottement ou de résistance au glissement). L'adhérence Pf_g peut être aussi considérée comme supérieure aux efforts que l'on peut exercer sur une roue bloquée sans la déplacer.

Valeur du coefficient f_g. — Il est très variable et dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont : la nature et la rugosité du sol, l'état hygrométrique de l'air, la conception du pneumatique et sa pression de gonflage, les dessins de la bande de roulement, le contact entre le caoutchouc et la jante. Certaines réactions internes du caoutchouc peuvent intervenir. La température ambiante exerce une action sur le pneu comme sur le sol. Pluie, neige et verglas modifient évidemment la valeur du coefficient d'adhérence (V. t. 4, La route, chap. 19). Nous nous contenterons d'indiquer qu'il peut être compris entre 0,1 et 0,9 pour les voitures particulières courantes, 0,1 correspondant à un cas extrême, heureusement peu fréquent, les valeurs les plus normales étant supérieures à 0,5. Pour certaines voitures de compétition pour lesquelles le contact pneu-sol est spécialement étudié, f_g peut exceptionnellement dépasser l'unité. L'adhérence est considérée soit longitudinalement (coefficient f_l), soit transversalement (coefficient f_t) ; elle est plus grande longitudinalement, sauf pour des voitures de compétition où l'adhérence transversale joue un rôle spécialement important dans les courbes.

2.1.2. Résistance au roulement. — Étudier le roulement c'est chercher d'abord à déterminer la résistance au roulement. Il convient de donner ici quelques définitions générales qui concernent le mouvement du véhicule et le roulement en particulier. Dans tout ce qui suit, le plan d'appui est supposé horizontal.

— *Voie.* — C'est la distance entre les centres des traces laissées par les pneumatiques des roues d'un même essieu sur le plan d'appui ; ces centres peuvent être assimilés aux points de contact des roues sur le sol (fig. II-4).

Fig. II-4

v : voie



— *Empattement.* — Si les segments qui correspondent aux voies d'essieux différents sont perpendiculaires au plan longitudinal de symétrie du véhicule, l'empattement est la distance des segments définis pour deux essieux consécutifs. Si le véhicule comporte plus de deux essieux, on indique les empattements en partant de l'essieu le plus en avant (fig. II-5).

Cas particulier. — Si le segment $A\,A'$ (fig. II-6) n'est pas perpendiculaire au plan longitudinal de symétrie, entre deux essieux consécutifs on définit deux empattements, l'un droit, l'autre gauche. De plus, dans ce cas, la voie de l'essieu correspondant au segment $A\,A'$ est égale à $(AH + H'A')$.

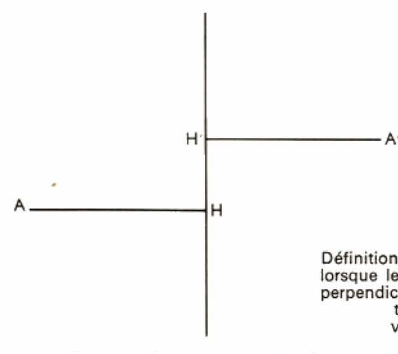


Fig. II-6

Définition de la voie d'un véhicule lorsque le segment AA' n'est pas perpendiculaire au plan de symétrie longitudinal
$v = AH + H'A'$

— *Rayon du pneu sous charge ou rayon statique du pneu.* — Distance du centre du pneumatique monté, pris sur l'axe de la jante, au plan d'appui du véhicule.

— *Rayon de roulement théorique ou rayon dynamique du pneu.* — On l'obtient en divisant par 6,28 (2π) la distance parcourue par l'axe de la roue lorsque celle-ci tourne d'un tour, le véhicule roulant à une vitesse déterminée fonction de la catégorie à laquelle il appartient (voiture particulière, véhicule utilitaire, etc.). La mesure est faite en prenant en compte un nombre entier de tours, durant une période où le véhicule ne subit ni accélération ni freinage ni dérive.

— *Roue au repos.* — Considérons le cas général d'une roue moins dure que le sol. La figure II-7 représente les

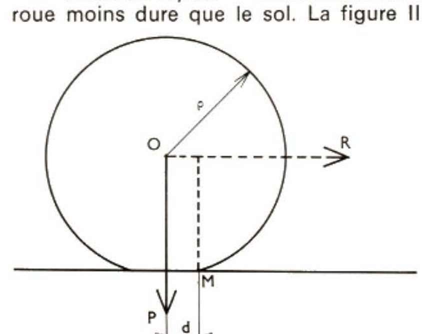


Fig. II-7

conditions géométriques du contact roue-sol. Immédiatement avant le roulement interviennent la charge P, qui s'exerce sur la roue, et une autre force qui est la résistance au roulement R_r. La roue et le point M demeurent en équilibre tant que $R_r\rho \approx Pd$, ρ étant le rayon statique du pneu. Le seul intérêt de cette formule approximative est de montrer que la résistance au roulement peut être d'autant plus petite que ρ est plus grand.

— *Roue en mouvement.* — La résistance au roulement dépend alors de nombreux autres facteurs : adhérence,

Voitures automobiles


Simca Rallye 2


Renault 16 TS

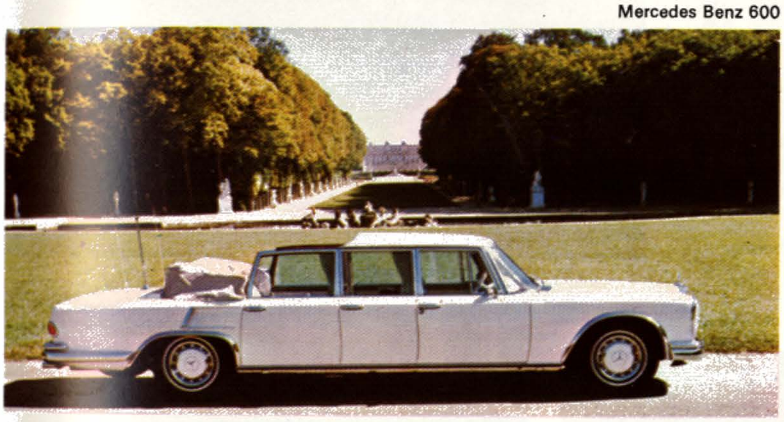
Citroën GS



Peugeot Coupé 504



Mercedes Benz 600




Lambretta Zele 1000 électrique

Renault R 17



Citroën SM



Photos : documents des constructeurs.



Mercedes Benz
450 SEL



Alpine
Renault



Peugeot
104



Simca
1301 S

Citroën
DS 21





BMW
525

Matra-Simca 670



Chrysler
2 litres



Mini Cooper



Minima



Citroën
Dyane



Photos : documents des constructeurs et J. Gauthier - Matra-Simca.

glissements (si faibles soient-ils) qui peuvent apparaître à la surface de contact pneu-sol, pression de gonflage des pneus, vitesse et accélération du véhicule.

Dans la « Dynamique des véhicules routiers » de Charles Deutsh, ingénieur général des Ponts et Chaussées, il est précisé que pour des conditions de charge, de montage et de gonflage déterminées, la résistance au roulement R_r en ligne droite est assez convenablement représentée par une formule pouvant se mettre sous la forme suivante :

$$R_r = a + bV^n$$

Cette résistance au roulement est comprise entre 10 et 20 daN. L'exposant n de la vitesse V varie fondamentalement avec la conception du pneumatique. Sur un pneu courant, la croissance peut être très rapide au-delà de la vitesse d'emploi autorisée. Les pneus de compétition sont au contraire conçus pour éviter un accroissement inadmissible de la résistance au roulement (c'est-à-dire une trop grande élévation de température).

Un souci normal des fabricants de pneumatiques et des constructeurs d'automobiles est la réduction de cette résistance au roulement, pour une conception et une charge données. Un procédé connu consiste à augmenter la pression de gonflage pour limiter les déformations mais le confort s'en trouve diminué. L'évolution des dimensions a son incidence ; le pneu large et de petit diamètre a une aire de contact elliptique dont le grand axe est transversal : l'écrasement relatif du pneu est réduit.

Très sensible à la charge portée, la résistance au roulement d'une roue l'est donc automatiquement aux transferts dynamiques nés du comportement de l'automobile.

Du même auteur nous reproduisons un graphique représentant, pour trois catégories de véhicules, la variation de la résistance au roulement exprimée en décanewtons par tonne en fonction de la vitesse du véhicule (fig. II-8). Il

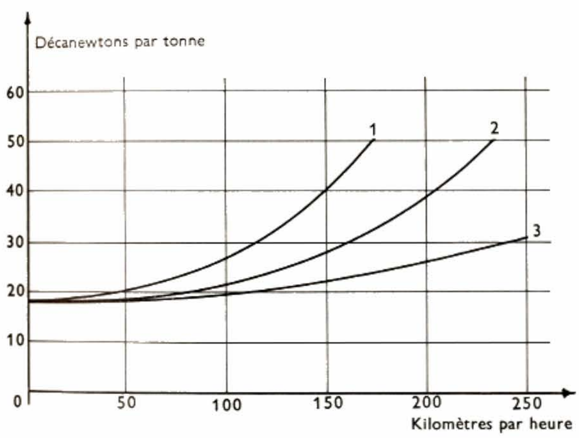


Fig. II-8 — Résistance au roulement en fonction de la vitesse des véhicules 1. Voitures particulières de série. — 2. Voitures rapides. — 3. Voitures de compétition

convient d'observer que le terme a intervenant dans la formule donnée est voisin de 10 daN avec certains pneumatiques et certaines voitures. Il dépasse nettement 20 daN pour des roues jumelées. Ce terme doit être approximativement doublé au démarrage mais il ne s'agit alors que d'une valeur momentanée et la formule donnée ne s'applique pas dans ce cas (elle a été établie pour un véhicule en mouvement).

2.2. Résistance de l'air R_a. — Lorsque le véhicule avance il est nécessaire de vaincre une force due à la présence de l'air et appelée résistance de l'air. Dans l'air calme et lorsque le déplacement se fait en ligne droite on admet que tout se passe comme si ce déplacement donnait naissance à un vent de vitesse égale en valeur absolue à celle du véhicule, mais de sens contraire à celle-ci. Même dans ce cas, la résistance de l'air est assez difficile à déterminer rigoureusement par le calcul lorsqu'il s'agit d'une voiture quelconque. Dans le cas théorique considéré au début de ce paragraphe, on propose souvent la formule suivante :

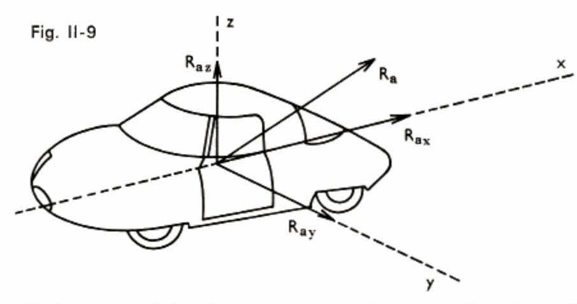
$$R_a = KSV^2$$

en appelant V la vitesse du véhicule, S la surface du maître-couple de la voiture (aire de la figure obtenue en projetant le contour du véhicule sur un plan perpendiculaire à la direction suivant laquelle il se déplace) et K un coefficient qui peut varier de 0,01 à 0,10. Les essais auxquels on procède font apparaître qu'une surface, sphérique à l'avant, complétée vers l'arrière par une surface conique tangente à la sphère conduit à une valeur de K plus faible qu'avec d'autres formes générales.

En réalité, le cas théorique favorable envisagé ci-dessus est très rare car l'air n'est jamais véritablement calme. Parmi les cas particuliers simples, citons celui qui se présente lorsque la direction du vent est parallèle à celle du déplacement : si le vent agit dans le sens opposé à celui du mouvement, pour calculer la résistance de l'air, il faut ajouter sa vitesse v à celle V du véhicule ; dans le cas contraire, le vent a tendance à pousser le véhicule et il faut retrancher v (valeur absolue) à V. Dans le cas général, il faut considérer que le vent souffle dans une direction déterminée quelconque.

Dans ce qui suit nous ne tiendrons pas compte des phénomènes locaux plus ou moins complexes liés à des turbulences dans l'atmosphère ou à la viscosité de l'air et nous admettrons que les différentes actions de l'air sur le véhicule ont une résultante à laquelle correspond un moment résultant. Nous considérerons les composantes de cette résultante suivant trois axes qui seront les arêtes d'un trièdre trirectangle. L'un des plans du trièdre sera horizontal et les plans verticaux seront l'un parallèle et l'autre perpendiculaire au plan longitudinal de symétrie du véhicule. Son sommet sera lié au véhicule et situé au centre de gravité de celui-ci. Nous appellerons R_{ax}, R_{ay}, R_{az}, les trois composantes de la résistance de l'air selon ces trois axes et T_x, T_y, T_z, les trois composantes du moment de R_a selon ces mêmes axes (fig. II-9). La composante R_{ax} longitudinale s'ajoute

Fig. II-9



algébriquement à la résistance au roulement ; elle est aussi appelée *traînée aérodynamique*. La composante transversale, R_{ay}, est dite aussi *force de dérapage* ; R_{az}, composante verticale, est la *force de portance*. Les composantes du moment résultant par rapport aux axes sont appelés : C_x, moment de *roulis*, C_y, moment de *tangage* et C_z, moment de *lacet*.

Les indications qui précèdent ne sont évidemment que des approches dans l'étude de la résistance de l'air.

Certes le produit SV^2 a son importance mais la valeur du coefficient K peut être réduite par la forme adoptée pour certaines parties du véhicule, indépendamment de la forme générale du véhicule. De ce fait, avec un véhicule dit « aérodynamique » la valeur de la résistance de l'air R_a pourra être limitée mais la réduction des autres composantes et des divers moments pourra conduire, en vue des grandes vitesses, à modifier la répartition des charges et à prendre dans le détail de nombreuses autres dispositions.

3. CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES DES ROUTES FRANÇAISES

3.1. Routes normales. — Le sol n'est pas toujours horizontal et les routes utilisées ne se présentent pas toujours en ligne droite. Il convient donc d'examiner les conséquences des rampes et des pentes, comme des phéno-

mènes qui apparaissent ou peuvent apparaître en virage. Nous indiquons certaines caractéristiques des routes françaises concernant ces différents points, telles qu'elles sont définies par la Direction des routes et de la circulation routière du ministère de l'Équipement et du Logement. Nous nous bornerons à des indications limites essentielles.

Les routes sont classées en considérant des « vitesses de référence » V_r qui s'appliquent en fait à des sections de route seulement et dont il est tenu compte dans l'étude de certains points particuliers de ces sections. Les vitesses de référence correspondent ainsi aux conditions de vitesse les plus sévères sur la section considérée. Cela a conduit à définir cinq catégories de routes correspondant aux vitesses de référence suivantes : 40 km/h — 60 km/h — 80 km/h — 100 km/h — 120 km/h.

Le tableau suivant donne les valeurs limites des déclivités admises pour les rampes et pentes (valeurs maximales) et les rayons admis en virage (valeurs minimales) en même temps que le dévers maximal correspondant.

Vitesse de référence V_r (kilomètres par heure)	40	60	80	100	120
Déclivités maximales dans les rampes (1)	8	7	6	5	4
Rayon minimal absolu (2)	40	120	240	425	665
Dévers maximal (1)	7	7	7	7	7
Rayon minimal normal (2)	120	240	425	665	1 000
Dévers minimal normal (1)	5	5	5	4	4
Rayon minimal : Avec dévers 2,5 % (chaussées en béton bitumeux) (2)	250	450	650	900	1 500
Avec dévers 2 % (chaussées en béton de ciment) (2)	300	500	700	1 000	1 600
S'il n'existe aucun dévers les rayons sont (2)	400	600	900	1 300	1 800

(1) pourcentages ; (2) mètres

Les dévers de 2,5 % et de 2 % correspondent aux valeurs minimales possibles pour les chaussées respectivement en béton bitumeux et en béton de ciment.

3.2. Cas particuliers — Régions accidentées — Routes en relief difficile.

— Il est admis que pour de telles routes les règles générales ne sont pas toujours applicables. Le rayon minimal peut, si nécessaire, être inférieur à 40 mètres. Dans le cas spécial des routes en lacets on évite simplement des rayons inférieurs à 8 mètres pour les routes peu fréquentées et des rayons inférieurs à 12 mètres pour des routes fréquentées.

La déclivité sur le bord intérieur des virages en lacets est limitée à 5 % pour les routes utilisables par temps de neige et de verglas et à 6 % pour les autres routes.

Les limites des déclivités en rampes sont :

— de 8 % pour les routes ouvertes toute l'année à la circulation et soumises habituellement à la neige et au verglas en hiver ;

— de 10 % dans le cas contraire, qui doit être exceptionnel, dans les régions vraiment accidentées ;

— de 10 % si les routes sont ouvertes à la circulation en été seulement.

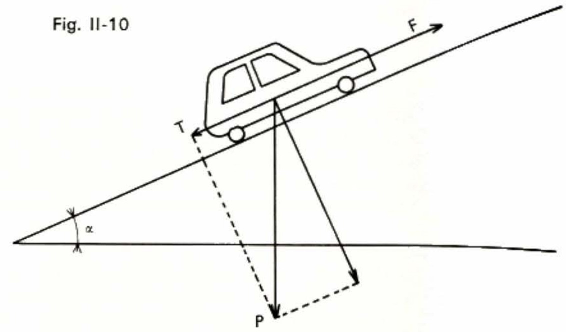
4. TENUE DE ROUTE

Le confort d'un véhicule et la sécurité qu'il assure aux passagers dépendent spécialement de certains organes ou ensembles d'organes tels que la direction avec ses caractéristiques particulières et la suspension (ressorts, amortisseurs, pneumatiques) et aussi du comportement du véhicule en face des accidents présentés par la route.

4.1. Rampes et pentes.

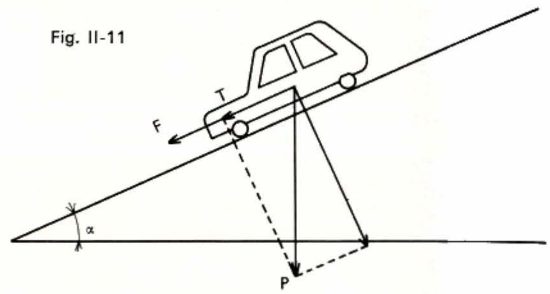
— Si un véhicule monte une rampe faisant un angle α avec un plan horizontal, à la résistance au roulement s'ajoute une force F. Si P est le poids du véhicule $F = P \sin \alpha$. Si la voiture descend une pente faisant un angle α avec un plan horizontal, à la résistance au roulement il faut évidemment retrancher une force $P \sin \alpha$ (fig. II-10 et II-11).

Fig. II-10



La force T s'ajoute à la résistance au roulement

Fig. II-11



La force T s'ajoute aux différentes forces de propulsion

4.2. Virages.

— Dans les virages, il faut tenir compte de l'inertie centrifuge due au mouvement circulaire. Tout se passe comme si une force centrifuge $F_c = m\frac{V^2}{R}$ était alors appliquée au véhicule (m : masse du véhicule, V : vitesse de celui-ci, R : rayon de courbure de la trajectoire) ; on exprime la force en newtons, la masse en kilogrammes, la vitesse en mètres par seconde et le rayon R en mètres.

Il importe donc de définir le rayon minimal de braquage pour chaque roue et le diamètre d'encombrement en virage dans chaque cas.

— *Rayon de braquage.* — Le rayon minimal de braquage d'une roue est le rayon du cercle enveloppe de la trace du plan médian de la roue sur le plan d'appui.

Quatre rayons de braquage sont à considérer (fig. II-12) :

- r_i et r_e respectivement rayon intérieur et rayon extérieur de braquage des roues *directrices ;*
- r'_i et r'_e respectivement rayon intérieur et rayon extérieur de braquage des roues *non directrices.*

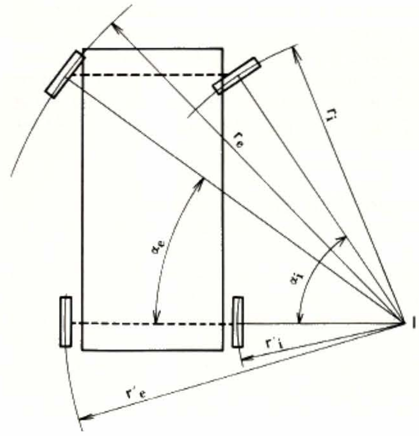


Fig. II-12

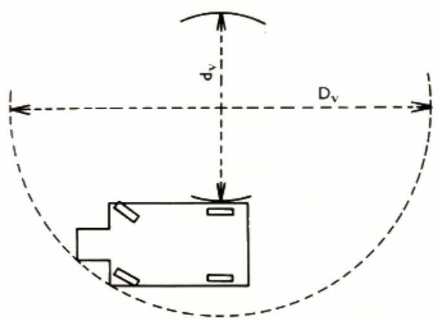
Les rayons de braquage doivent être mesurés en virant d'abord à droite puis à gauche. Les roues directrices sont braquées à fond durant la mesure et le véhicule se déplace très lentement.

— *Diamètres d'encombrement en virage.* — Les diamètres de deux cercles peuvent être définis :

- l'un D_v est le diamètre minimal d'un cercle à *l'intérieur* duquel se trouvent les projections sur le plan d'appui de *tous* les points du véhicule,
- l'autre d_v est le diamètre maximal d'un cercle à *l'extérieur* duquel se trouvent les projections sur le plan d'appui de *tous* les points du véhicule.

Les diamètres d'encombrement en virage doivent être mesurés à droite puis à gauche (fig. II-13). Les conditions de la mesure sont les mêmes que pour la mesure des rayons de braquage.

Fig. II-13



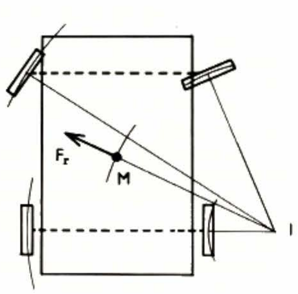
En examinant l'épure de Jeantaud simplifiée, nous constatons que les rayons de braquage des roues sont différents lorsque la direction fonctionne correctement ; pour un angle de braquage suffisant, le centre instantané de rotation est le même pour les quatre roues (V. fig. II-12).

— *Dévers.* — La solution couramment adoptée pour éviter les conséquences de l'action de l'inertie centrifuge (dérapage) consiste en un relèvement des virages ou *dévers*, c'est-à-dire en une rampe vers l'extrémité du rayon extérieur de la courbe de la route.

L'adhérence transversale ou latérale intervient également en limitant les risques de dérapage.

Les rayons des roues étant différents, la charge n'étant pas répartie également entre les roues d'un véhicule, l'examen complet de cette question est délicat. Aussi, nous bornerons-nous à étudier le mouvement du centre de gravité du véhicule dans l'hypothèse d'un mouvement circulaire uniforme de vitesse V (fig. II-14). Nous supposons d'abord qu'il n'existe pas de dévers et ensuite qu'un dévers d'angle α a été prévu.

Fig. II-14



Le mouvement étant uniforme, nous considérerons que les trois forces en présence sont les suivantes : P : poids du véhicule, R : réaction du sol (égale à P en valeur absolue) F_c : force centrifuge.

- *Sans dévers.* — Considérons un virage dont le rayon minimal normal est de 400 mètres et un véhicule roulant à 36 km/h, soit 10 m/s. Dans ce cas :

$$\frac{V^2}{R} = \frac{100}{400} = 0{,}25$$

Pour chaque roue la force centrifuge $\frac{mV^2}{R}$ est alors à comparer à l'adhérence $pf_t = mgf_t$, le coefficient f_t correspondant à l'adhérence transversale et g désignant l'accélération de la pesanteur ($g = 9{,}81$ m/s²). Nous admettons que pour chaque roue m est voisin de $\frac{M}{4}$ et p de $\frac{P}{4}$, M et P correspondant respectivement aux masse et poids du véhicule.

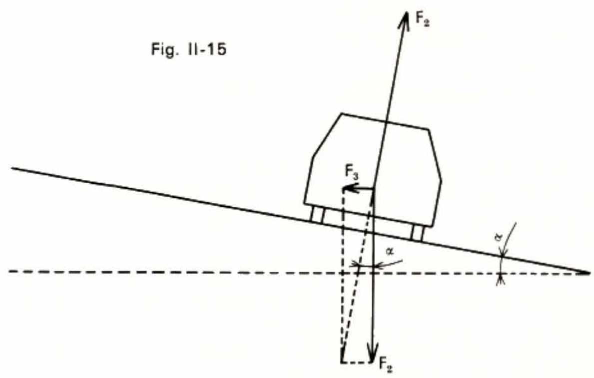
Pour que le véhicule ne dérape pas il faut satisfaire la condition suivante :

$\frac{mV^2}{R} < mgf_t$ ou $\frac{V^2}{R} < gf_t$. Si nous adoptons $f_t = 0{,}6$, valeur relativement faible pour une bonne route et de bons pneumatiques, nous constatons que l'inégalité précédente est satisfaite ($0{,}25 < 9{,}81 \times 0{,}6$) c'est-à-dire que l'adhérence suffit à compenser la force centrifuge.

Pour les vitesses plus grandes, la marge est moins évidente ; si $V = 30$ m/s, un coefficient d'adhérence de 0,6 est suffisant mais sans plus. En conclusion, il convient de ne pas rouler trop vite dans les virages sans dévers.

- *Avec dévers.* — Nous conservons les hypothèses générales précédemment indiquées et procédons à un premier calcul théorique sans faire intervenir le coefficient f_t. Si les trois forces, F_1, F_2 et F_3 sont en équilibre relatif (fig. II-15), il apparaît que :

Fig. II-15



$$\text{tg}\alpha = \frac{F_3}{F_2} = \frac{m\frac{V^2}{R}}{mg} = \frac{V^2}{Rg}$$

Dès lors, pour $V = 10$ m/s et $R = 400$ mètres, nous trouvons : $\text{tg}\alpha = \frac{100}{392}$ (pour $g = 9{,}81$ m/s²) et $\alpha = 15°$ environ ; pour $V = 20$ m/s et $R = 120$ m, le même calcul conduit à $\alpha = 19°$ environ.

Il s'agit de dévers qui n'existent pas dans la pratique, un dévers de 7 % correspondant à un angle légèrement supérieur à 4 degrés.

Le calcul qui précède ne tient compte ni de l'adhérence, ni du phénomène complexe que représente la répartition inégale sur les quatre roues des forces que nous avons indiquées. Il s'agit donc d'un calcul élémentaire illustrant sommairement les effets de l'inertie centrifuge.

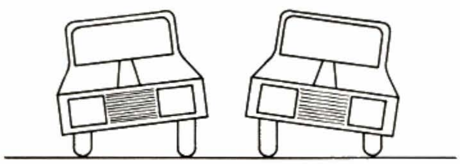
Les coefficients qui représentent l'adhérence longitudinale ou transversale peuvent varier sensiblement et les valeurs indiquées dans les ouvrages sont ou bien des valeurs limites ou des valeurs minimales. En tout cas, il faut considérer que le dévers n'annule pas à lui seul, aux grandes vitesses surtout, les effets de l'inertie centrifuge ; c'est la combinaison des effets du dévers et de l'adhérence qui évite le dérapage. Bien entendu, l'expérience et la prudence du conducteur doivent entrer en ligne de compte.

4.3. Dérive. — La dérive apparaît lorsque le pneu peut subir une déformation transversale (du fait d'une pression de gonflage insuffisante ou d'un montage défectueux)ou sous l'action d'un effort transversal (force centrifuge, vent, etc.). Toutes ces circonstances provoquent la poussée de dérive (poussée transversale). S'il y a dérive et que les pneus avant et arrière sont affectés différemment par la poussée correspondante, la voiture peut devenir sous-vireuse ou survireuse.

4.4. Roulis, tangage, lacet, shimmy. — Ces mouvements parasites limitent évidemment la stabilité de la voiture. Il y a roulis lorsque se produit un balancement latéral du

véhicule et tangage lorsque le balancement est longitudinal. Le roulis apparaît lorsqu'un effort vient rompre la symétrie dynamique en provoquant un déséquilibre latéral; le tangage se produit lorsqu'un effort anormal est exercé sur l'un des deux essieux seulement, provoquant ainsi un déséquilibre longitudinal. Le mouvement en lacet, accidentel, intervient à la suite de changements de direction, à droite puis à gauche, par rapport à la direction normale du mouvement (fig. II-16 et II-17). Les mouvements qui correspondent au shimmy peuvent apparaître à l'occasion

Fig. II-16



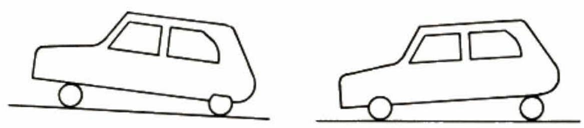


Fig. II-17

d'un accident du terrain, très localisé, ou de toutes causes qui provoquent des vibrations se transmettant souvent jusqu'au volant. Le shimmy est peu fréquent avec les roues indépendantes.

Ces mouvements parasites dépendent évidemment du comportement des amortisseurs et de la suspension en général. Ils dépendent aussi de la direction et des caractéristiques en quelque sorte géométriques des liaisons roues-véhicule: carrossage, inclinaisons de pivot, châsse, pincement (V. t. 4, La route, chap. 21).

4.5. Répartition des masses. — La stabilité d'un véhicule roulant dépend naturellement de la répartition des masses qu'il transporte. Le centre de gravité du véhicule doit être le plus bas possible et dans le plan de symétrie longitudinal du véhicule (égalité des charges sur les deux roues d'un même essieu) un peu en avant du métacentre, pour que l'action de la résistance de l'air appliquée en ce métacentre soit stabilisatrice. Cette disposition valable pour tous les véhicules, y compris à deux roues, est particulièrement importante pour les véhicules utilitaires.

En ce qui concerne les voitures particulières et leurs passagers, nous mentionnons ci-après, à titre indicatif, les propositions présentées par l'ISO qui cherche à faire adopter, dans la mesure du possible, des dispositions uniformes pour les masses placées dans le véhicule. Les masses conventionnelles données correspondent évidemment à des valeurs minimales:

— passagers: 68 kg en moyenne par siège, pour une personne;

— bagages: la masse minimale est obtenue en multipliant 7 kg par le nombre des passagers; cette masse doit être répartie uniformément dans le coffre à bagages c'est-à-dire que les charges doivent être égales sur les deux roues d'un même essieu.

À l'occasion d'un chargement, s'il est nécessaire de placer des marchandises à l'arrière du véhicule, elles doivent être réparties de la même manière que le seraient les masses des passagers dont elles prennent la place.

Les règles qui précèdent s'appliquent à des véhicules de moins de 3,5 t de charge totale, transportant moins de neuf personnes, conducteur compris. Elles permettent de déterminer la masse minimale que doit pouvoir transporter un véhicule de cette catégorie. Si un constructeur indique une charge possible (et il s'agit d'un cas fréquent) correspondant à une masse totale supérieure à celle à laquelle on serait conduit avec les dispositions qui précèdent, pour les voitures particulières il convient de procéder, dans toute la mesure du possible, à une répartition uniforme des masses. Si une partie du véhicule est utilisée pour le transport de marchandises on veillera à placer les objets les plus denses au voisinage du plan de symétrie longitudinal et le plus bas possible.

Dans le cas des camions poids lourds il convient, en outre, de respecter les règlements qui fixent la masse maximale par essieu et la charge totale maximale admise.

4.6. Règlement concernant la tenue et la stabilité des véhicules en mouvement — Essais particuliers. La Direction des routes et de la circulation routière a établi, au titre du ministère de l'Équipement et du Logement, des prescriptions concernant les constructeurs de véhicules, et indiqué les essais à effectuer pour vérifier la tenue de route et la stabilité des voitures dans certaines circonstances.

Ces prescriptions ont fait l'objet d'une circulaire adressée aux ingénieurs en chef des mines chargés d'un arrondissement minéralogique. Les ingénieurs qui ont étudié les problèmes correspondant considèrent que s'il est relativement facile de comparer la tenue de route des véhicules entre eux, il est plus difficile de fixer des caractéristiques numériques qui permettent de juger objectivement en la matière. Il faut considérer la route, d'une part, le véhicule, d'autre part, et plus spécialement le pneumatique qui assure le premier contact roue-sol. Si l'on veut étudier le véhicule lui-même, il faut éliminer le conducteur et admettre que les essais prévus sont accessibles à la majorité des conducteurs d'automobiles. Par ailleurs, les rapports véhicules-routes et, plus particulièrement, pneus-routes dépendent de facteurs variables suivant les saisons, par exemple, et suivant les routes elles-mêmes. Même les chaussées des pistes d'essais peuvent être différentes d'un centre à l'autre. Les *documents à fournir* comportent, outre les caractéristiques statiques des voitures, des renseignements détaillés avec croquis éventuellement sur les points suivants: monte en pneumatiques, attache de suspension sur chacune des quatre roues, essieu avant, plan d'ensemble de la direction avec indication de la démultiplication, épure relative aux variations de carrossage et de pincement.

Les essais exigés portent sur:

— *La vitesse maximale du véhicule* qui est mesurée sur anneau et correspond à une distance parcourue d'au moins 20 kilomètres; la stabilité de route du véhicule est vérifiée à cette vitesse en ligne droite et à volant libre.

— *La tenue sous accélération transversale constante:* le véhicule doit pouvoir maintenir sa trajectoire sur un cercle dans des conditions qui correspondent à une accélération transversale au moins égale à 0,5 *g* (*g* désignant l'accélération terrestre).

— *La rigidité de torsion du véhicule* qui ne doit pas être inférieure à 2 000 Nm/degré.

— *La déformation des trains de roulement:* les variations de pincement et de carrossage correspondant à la mise en charge de l'essieu sont vérifiées à chaque essai et doivent correspondre aux renseignements fournis sur ce point (V. t. 4, La route, chap. 21).

— *L'essai de déboîtement:* le véhicule doit parcourir la trajectoire indiquée sur la figure II-18. Les 120 mètres sont parcourus en 5 secondes au plus avec une tolérance de

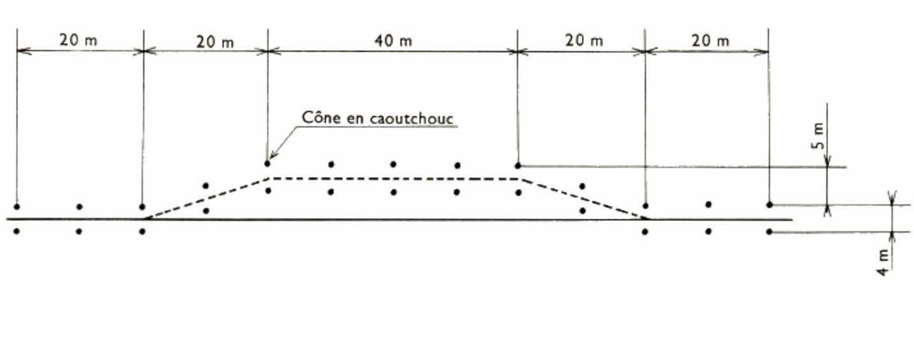


Fig. II-18

Les cônes en caoutchouc limitent une largeur de 4 m
L'axe de déboîtement se trouve à 5,5 m de l'axe initial

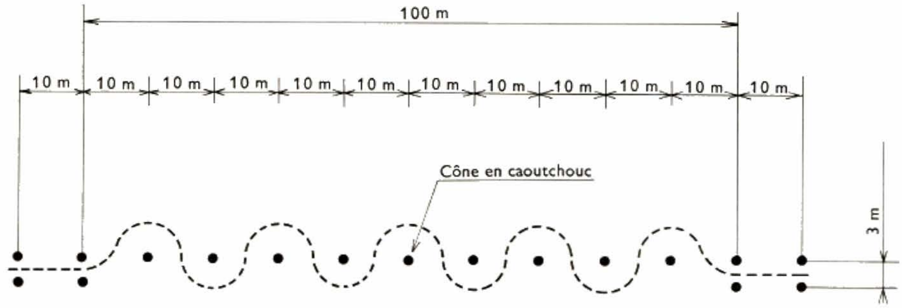


Fig. II-19

Essais de zigzag
Aux extrémités
les cônes en caoutchouc
limitent une largeur de 3 m

0,5 seconde. Le tracé est jalonné par des cônes en caoutchouc. On effectue dix passages dans les deux sens et il ne faut pas que plus d'un cône en caoutchouc soit abattu. La circulaire officielle prévoit que l'on prend la moyenne des meilleurs temps comme indice de la facilité et de la rapidité avec laquelle la voiture est utilisable pour faire la manœuvre. Il semble que la qualité de la manœuvre, donc du conducteur, joue un certain rôle dans la détermination de cet indice.

— *Les essais de zigzag :* le véhicule doit parcourir une trajectoire déterminée (fig. II-19). Les 100 mètres (cotés) doivent être parcourus en 13 secondes au plus avec une tolérance de 0,5 seconde. Dix passages dans chaque sens sont exigés et l'on procède ensuite comme ci-dessus (il ne faut pas que plus d'un cône soit abattu).

Il semble que les dispositions qui figurent dans la circulaire ci-dessus résumée font appel à de nombreuses considérations objectives mais n'éliminent pas le coefficient personnel lié au conducteur (notamment dans les deux derniers essais mentionnés).

5. SÉCURITÉ INDIVIDUELLE — CEINTURES DE SÉCURITÉ

La tenue de route d'un véhicule doit assurer la sécurité de l'ensemble des passagers et du fret face aux « accidents » habituels de la route tels que virages et pentes, par exemple. Lorsque des accidents imprévisibles se présentent, les passagers courent d'autres risques. Dans chaque type de véhicule, on les limite, par des dispositions intérieures convenables (rembourrage des portes anguleuses en particulier) mais surtout par l'emploi de dispositifs de retenue dont le plus répandu est actuellement la ceinture de sécurité pour automobilistes.

5.1. Description sommaire des ceintures de sécurité pour adultes. — Elles sont composées de sangles en tissu assemblées et ancrées par des pièces de fixation à la structure du véhicule. L'ancrage est souvent fait dans un trou taraudé. Une boucle et, généralement, un dispositif de réglage permettent d'adapter la ceinture au corps du passager.

Quatre types principaux de ceintures sont utilisés (fig. II-20).

— La ceinture sous-abdominale (posée sur les cuisses et non pas serrée à la taille) qui retient la partie inférieure du tronc.

— La ceinture trois points, apparemment la plus sûre, qui comprend une ceinture sous-abdominale et une sangle diagonale pour retenir la partie supérieure du tronc.

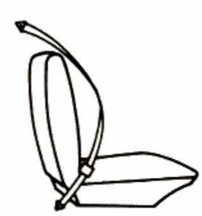
— La ceinture diagonale : une sangle seule qui part de la hanche et aboutit à l'épaule opposée.

— La ceinture-harnais : une sangle sous-abdominale et des bretelles (cette ceinture est plutôt réservée à des cas particuliers comme les voitures de compétition).

5.2. Ancrages des ceintures. — Il existe des ancrages au plancher et des ancrages latéraux (fig. II-21). Ces derniers ne doivent être utilisés que si la structure de la voiture offre une résistance suffisante dans sa paroi latérale. Les

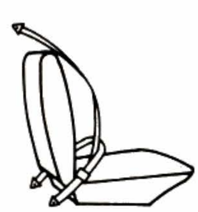


a



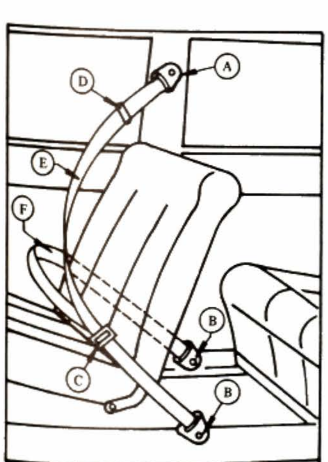
b

a) Ceinture sous-abdominale
b) Ceinture diagonale
c) Ceinture trois points



c

Fig. II-20

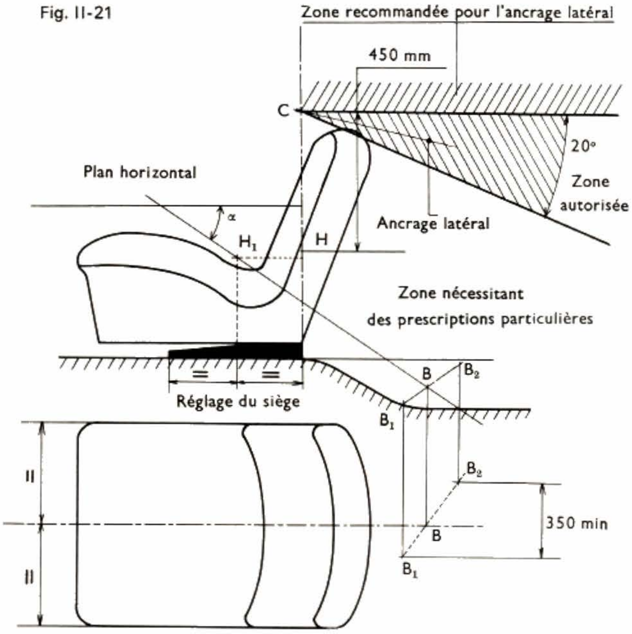


d

d) Ensemble ceinture de sécurité

A. Pièce d'ancrage latéral
B. Pièce d'ancrage au plancher
C. Boucle
D. Dispositif de réglage
E. Ceinture diagonale
F. Ceinture sous-abdominale

Fig. II-21



Les points H, dont les positions dépendent du réglage du siège, pour un passager déterminé, sont les traces de l'axe de rotation de fémur sur le plan longitudinal de symétrie du siège correspondant

ancrages doivent pouvoir résister à des efforts supérieurs, en principe, à ceux qui sont imposés aux ceintures.

5.3. Réglementation. — Nous résumons ci-après les articles les plus importants de l'arrêté du 5 février 1969 (J.O. du 8 février 1969 ; Art. 1, 2 et 4).

— Les places avant des voitures particulières doivent être équipées, depuis le 1er avril 1970, de ceintures de sécurité.

● Places latérales : ceinture trois points.

● Places centrales : ceinture sous-abdominale ou ceinture trois points. Toutefois, la ceinture à la place centrale n'est obligatoire que pour les voitures mises en circulation depuis le 1er septembre 1971.

— Il doit être prévu des ancrages pour toutes les places assises.

De nombreux essais sont exécutés pour vérifier les différentes pièces qui constituent l'ensemble de la ceinture : résistance des sangles, conditions d'ouverture et de fermeture de la boucle, résistance de l'ensemble de la ceinture et des ancrages. Les essais des pièces composantes sont généralement des essais statiques. Pour les ceintures montées, il est maintenant prévu des essais dynamiques. En France, les laboratoires de l'U.T.A.C. à Montlhéry sont chargés des essais prévus par les arrêtés sur les ceintures et publiés au Code de la route. Ces essais ont pour but d'étudier le comportement des ceintures soumises à des efforts fixés dans les cahiers des charges qui accompagnent les règlements.

5.4. Diffusion des ceintures de sécurité. — La ceinture de sécurité pour automobilistes est diffusée depuis longtemps dans certains pays. Sans prétendre formuler une règle absolue, les pays nordiques, parmi lesquels la Suède a donné l'exemple, utilisent largement ce dispositif de retenue, alors qu'italiens et français ont hésité à en faire usage. Vers 1965, la plupart des voitures suédoises étaient munies de ceintures. Aux Pays-Bas et en Suisse, des vérifications faites à la même époque permettent de constater que 30 à 40 % de véhicules en étaient pourvus alors qu'en France il n'y en avait que 10 %.

Actuellement, la mise en place des ceintures sur les véhicules est obligatoire dans quatorze pays européens.

— *Avantages de la ceinture de sécurité.* — Des statistiques sérieuses montrent que l'emploi de ce dispositif de retenue limite presque toujours, d'une manière notable, la gravité des accidents. De telles statistiques ont été établies depuis longtemps par des laboratoires suédois et britanniques et, plus récemment, dans d'autres pays dont la France où les laboratoires de l'U.T.A.C. ont poussé très loin l'étude des essais des ceintures et de leurs possibilités. Les laboratoires de la Sécurité routière de la General Motors ont constaté que sur 160 accidents étudiés, 99 % des personnes portant des ceintures de sécurité à la taille et aux épaules n'ont pas été blessées ou n'ont subi que des blessures légères. Mais il suffit de citer les résultats des dernières statistiques suédoises pour convaincre les automobilistes. Ces statistiques portent sur 28 761 cas d'accidents pour 37 511 occupants des places avant :

1° Le passager non ceinturé du siège avant est plus souvent blessé que le conducteur non ceinturé.

2° Pour les occupants ceinturés, les blessures mortelles se sont produites lorsque la vitesse était supérieure à 100 km/h. Sans ceinture les blessures mortelles correspondirent à des vitesses variables, mais supérieures à 30 km/h.

3° Pour les blessures non mortelles, le taux de *réduction* de leur gravité varie entre 57 % aux vitesses faibles, et 58 % aux grandes vitesses.

4° L'éjection hors de voiture d'occupants de siège avant s'est produite dans 158 cas sans ceinture, et dans un seul avec ceinture.

L'Université Cornell aux États-Unis d'Amérique, après une analyse portant sur 70 000 véhicules impliqués dans des collisions, a estimé que le risque de mort était plus élevé de 30 % pour les conducteurs sans ceinture que pour ceux qui en portaient.

— *Critique des ceintures de sécurité.* — Nous examinerons les plus fréquentes.

1° Les ceintures de sécurité gênent les mouvements des conducteurs ou passagers qui les utilisent.

● Si la ceinture est placée correctement et si le dispositif de réglage est utilisé normalement, cette gêne est minime. Cependant, des appareils simples appelés « enrouleurs-dérouleurs » ou « rétracteurs » ont été mis au point et sont utilisés depuis un certain temps. Ils permettent le déroulement de la ceinture en cas de déplacement lent de l'utilisateur sur son siège, lorsqu'il se penche légèrement en avant par exemple. Lorsque le passager reprend sa position initiale, le « rétracteur » agit de telle manière que la ceinture suit le corps du passager. Au contraire, en cas de déplacement brutal, le dispositif se bloque instantanément et la ceinture retient effectivement l'automobiliste.

2° La ceinture diagonale, qu'elle soit seule ou appartienne à un ensemble à trois points, dans certains cas peut cisailler le cou du passager.

● Cet accident peut se produire surtout avec la ceinture diagonale simple lorsque la mise en place de la ceinture est défectueuse. Il faut donc suivre exactement les instructions du fabricant de la ceinture ou du constructeur du véhicule si celui-ci a livré lui-même ladite ceinture. Cependant, la non symétrie de la retenue tendrait à provoquer, en cas de choc, une torsion latérale de la colonne cervicale.

3° La critique que beaucoup d'automobilistes considèrent comme la plus grave est liée précisément à l'éjection, possible ou non, ou aux difficultés que l'on peut rencontrer pour ouvrir la boucle de la ceinture et quitter la voiture.

● Dans les deux cas, les critiques supposent que la voiture prend feu et estiment qu'il vaut mieux être éjecté plutôt que de brûler dans la voiture. L'éjection (même en l'absence de ceinture) se produit généralement à de grandes vitesses et elle entraîne très souvent la mort. Cela diminue déjà beaucoup la portée de la critique. Par ailleurs, si l'incendie ne se produit pas instantanément, le passager a généralement le temps de quitter la voiture s'il n'est pas choqué et il a beaucoup plus de chance de ne pas l'être s'il utilise une ceinture de sécurité. Certes les ceintures de sécurité ne permettent pas toutes les imprudences et n'autorisent pas toutes les négligences mais elles améliorent très nettement la sécurité apportée aux automobilistes. Le nombre de pays qui en rendent le port obligatoire ne cesse d'ailleurs d'augmenter pour cette raison.

CHAPITRE III

CARROSSERIE

Les dénominations traditionnelles de voitures, basées sur le nombre des portes et de glaces ont parfois perdu de leur actualité. On les rappellera cependant.

— Une *limousine* est une voiture à quatre portes et six vitres ; c'est le cas de la Renault 16 (avec une cinquième porte arrière) ; qui l'a jamais appelée ainsi ?

— Un *coupé* comporte deux portes et deux vitres selon la norme B.N.A. 270, ce qui laisse entre la glace latérale de portière et la glace arrière un important panneau de carrosserie dit panneau de custode qui est opaque ; les carrossiers lui ont préféré une glace latérale fixe, descendante ou s'entrebâillant par flexibilité de la glace. Cependant une voiture à deux portes et quatre glaces, selon la norme, est un *coach* mais plus personne n'emploie cette expression. Le coupé, même avec quatre vitres, reste un coupé.

— Une *berline* comporte deux portes et quatre places ; elle répond parfaitement à la norme et son appellation a été conservée.

— Un *break*, réglementairement, doit comporter deux portes et quatre vitres. On en voit maintenant à quatre portes. Certains coupés avec un immense hayon sont devenus à leur tour des breaks mais de grand luxe.

1. QUELQUES POINTS D'HISTOIRE

Dans la construction automobile, le temps est passé où l'on pouvait différencier systématiquement le cadre ou châssis, destiné à supporter les éléments mécaniques, et la carrosserie dont le rôle est d'envelopper et de protéger conducteurs, passagers et lesdits éléments mécaniques.

L'automobile à ses débuts ne fut guère qu'une voiture à cheval sur laquelle était monté un moteur à vapeur, à pétrole ou électrique. Le principe de la charrette (deux poutres-brancards supportant, d'une part, des ressorts pour les roues et, d'autre part, des ridelles de maintien des panneaux latéraux et arrière) est resté longtemps le dogme élémentaire et essentiel du constructeur et du carrossier ; les deux brancards sont devenus longerons et jusqu'en 1904 il était courant de les prévoir en bois armé, solution qui avait remplacé le système du châssis en tubes car lorsque les moteurs devinrent plus puissants, les tubes cédaient à l'emplacement des soudures. Toutefois, en 1902 les Forges de Douai créaient les châssis Arbel en tôle d'acier emboutie et les châssis cuirassés, constitués par une seule tôle sans aucune pièce rapportée. Ce furent les premiers châssis modernes et dès 1904 les grandes marques commandèrent leurs châssis à Douai.

Le radiateur était en règle générale placé à l'avant (sauf chez Louis Renault) afin d'assurer le refroidissement maximal des moteurs tournant de plus en plus vite et dont le nombre de cylindres, placés en ligne, augmentait régulièrement, 4, 6, 8, 12 ; cela se traduisait par un poids considérable à l'avant, nécessitant de très longs capots (dont les stylistes ont toujours conservé la nostalgie). Ainsi la place du chauffeur était reportée au centre du véhicule et la banquette arrière se trouvait à l'aplomb de l'essieu-moteur, emplacement très inconfortable.

Sur ce schéma intangible le carrossier aménageait une carrosserie en bois, en tôle ou même, tel Weymann, en simili-cuir tendu sur cadre, solution qui fut envisagée en 1939 pour les prototypes de la 2 CV Citroën (toile tendue sur tubes). Le constructeur d'automobiles livrait donc un certain type de châssis avec tous les éléments mécaniques et parfois avec les ailes avant et le capot. Le carrossier avait établi avec son client une fiche de travail extrêmement détaillée et comportant le type de caisse (torpedo, berline limousine, coupé, etc.), le matériau (bois, tôle), la forme des sièges, leur garniture, les accessoires ou équipements (malle, cantine de bord, meuble de séparation, galerie de toit, porte-bagages, sellerie, trompes, phares, lanternes, capote, compas, marchepieds, coffre à outils, audiophone, et jusqu'aux armoiries ou initiales à peindre sur les bandeaux de portières). Ce libellé de commande comportait généralement deux ou trois feuillets de nomenclature.

De telles pratiques artisanales aboutissaient à la réalisation de véritables chefs-d'œuvre de solidité, de finition et de bon goût mais ce travail « fait main », un peu analogue à de la haute couture, revenait à des prix très élevés. Dès 1919, Citroën lançait ses premiers modèles de série et comme chez Ford seuls étaient prévus quelques types bien définis, torpedo, coupé-docteur, conduite intérieure, avec des équipements standard fournis avec la voiture. Le nombre de teintes était restreint et chez Ford il était même limité au noir.

À côté des voitures de série populaires et relativement bon marché on trouvait de nombreux modèles et la profession de carrossier était prospère. Les grands constructeurs qui avaient survécu au bouleversement économique de l'après-guerre (Bugatti, Delahaye, Delage, Delaunay-Belleville, Panhard et Levassor, Peugeot, Renault, Rochet-Schneider, Talbot, pour ne citer que des Français) en dehors de leur production en série continuaient à livrer des châssis nus destinés aux carrossiers français dont ce fut l'âge d'or. De cette époque datent de très belles voitures faites à l'unité et sur lesquelles, comme sur les tableaux ou les bijoux, la spéculation a jeté son dévolu.

2. LA FIN DES GRANDS CARROSSIERS ET L'ÈRE INDUSTRIELLE

Pendant ce temps, les constructeurs d'automobiles se rendaient compte à quel point châssis, mécanique et carrosserie étaient indissociables. L'augmentation des puissances, malgré la diminution des cylindrées, l'accroissement des vitesses, même sur mauvaises routes, provoquaient un hiatus permanent entre la conception de la mécanique et la réalisation du véhicule carrossé artisanalement ; des attaches, des ferrures de caisse se rompaient aux points délicats que sont les portières et la jonction avec les tabliers et les capots.

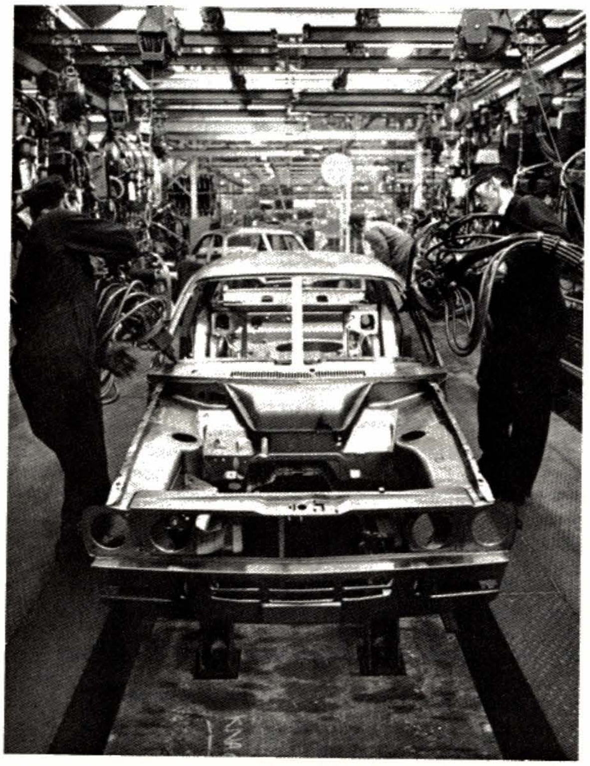


Fig. III-1 — Chaîne de montage de carrosseries ; ici, opération de soudure par points à l'aide d'unités manuelles (*Chrysler France*)

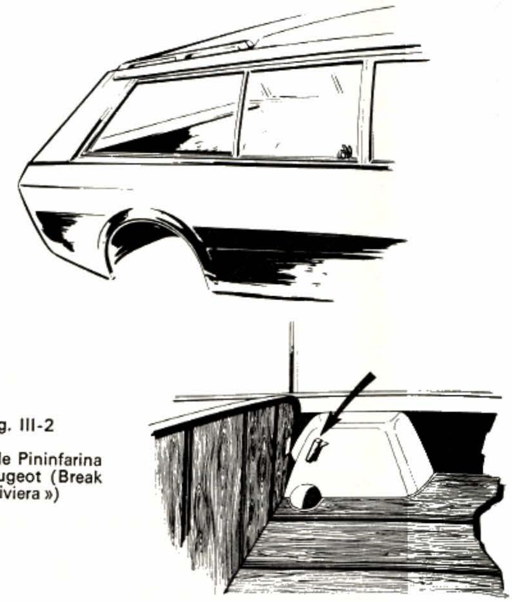


Fig. III-2

Études de Pininfarina pour Peugeot (Break « Riviera »)

À cette époque, les carrossiers s'adressaient à des stylistes privés. Le même homme établissait des croquis, les plans, les perspectives. Une maquette en plâtre à grandeur réelle ne pouvait être réalisée s'il s'agissait d'une commande à l'unité et le client ne se rendait compte de l'allure de son futur véhicule que par des gouaches en perspectives souvent trompeuses.

Cette séparation des tâches entre ingénieur, constructeur, styliste, carrossier avait de graves inconvénients ; tel châssis, convenablement garni de lest ou de gueuses, se révélait parfait aux essais mais ne tenait plus la route une fois carrossé par un façonnier ; les stylistes concevaient des formes telles que le radiateur ou les tambours de freins n'étaient pas suffisamment ventilés ; les carrosseries étaient parfois si lourdes qu'un train de pneus ne tenait que quelques milliers de kilomètres.

En 1934, Citroën, qui ne livrait que très rarement une voiture à un carrossier, lançait la carrosserie coque en tôle emboutie dans ses propres usines. Plancher, panneaux latéraux, caissons augmentaient considérablement la rigidité de l'ensemble. D'autres constructeurs réalisaient des carrosseries avec tubes de sections différentes selon les torsions qu'elles supportaient et fortement entretoisées. Les coques autoportantes étaient silencieuses (sans grincements entre châssis et carrosserie) et présentaient une garantie en cas d'accident.

Le divorce était dès lors prévisible entre constructeurs et carrossiers. Il fut consommé dès la fin de la seconde guerre mondiale. La Régie nationale des usines Renault montrait à l'Europe la voie de l'automobile de grande diffusion en présentant une 4 CV simple, populaire, économique.

Tous les constructeurs suivirent le même chemin en ajoutant peu à peu à leur gamme des modèles plus luxueux mais toujours construits entièrement à la chaîne. Seuls ou presque en Europe, les carrossiers italiens survécurent.

À côté d'exercices de style sur des modèles de luxe destinés aux salons d'automobile, les carrossiers italiens travaillent pour les grands constructeurs, établissent des prototypes qui seront réalisés ensuite à la chaîne, à l'usine ou en petites séries chez eux-mêmes ; en ce dernier cas ce sont surtout des coupés ou des voitures de sport. Il est même fréquent qu'ils soient appelés en consultation par des constructeurs étrangers, (ainsi Peugeot fait appel à Pininfarina pour chacun de ses nouveaux modèles).

Les carrossiers italiens ont d'ailleurs de véritables bureaux d'études avec des équipes nombreuses de concepteurs et de dessinateurs. Ils possèdent des machines à dessiner électroniques, des souffleries, des bancs d'essais. Le styliste en chambre travaillant individuellement a disparu, dans le domaine de l'automobile.

En France, les carrossiers n'ayant plus de châssis traditionnels à leur disposition ont dû se reconvertir, dès 1945, dans le véhicule utilitaire ou l'autocar (ou même dans la réparation, ce qui les assimile de plus en plus aux garagistes).

3. LES CARROSSERIES D'AUTOBUS ET D'AUTOCARS

Les transporteurs spécialisés dans le grand tourisme ne trouvent pas toujours chez les constructeurs de poids lourds l'autocar susceptible de convenir à leur clientèle. Le car de ligne, destiné à un trafic régulier de voyageurs, comporte un maximum de sièges revêtus de tissu plastique, n'a pas de climatisation, de toilettes, de bar, de soutes capitonnées pour les bagages ; il s'apparente quelque peu à l'autobus.

Des différences essentielles séparent cependant l'autobus de l'autocar de tourisme ; le premier n'a pas de soutes à bagages ce qui permet d'établir un plancher bas qui facilite les montées et descentes continuelles des voyageurs. Le moteur ne peut donc être mis sous le plancher et il est placé à l'avant près du conducteur ; celui-ci est donc placé plus haut que les voyageurs. En revanche, l'autocar doit obligatoirement comporter de vastes soutes à bagages ; la soute placée à l'arrière sert au logement du moteur et l'on peut la « coconner » avec soin, ce qui atténue considérablement le bruit du moteur ; ainsi les passagers sont installés assez haut au-dessus des soutes ce qui leur donne une excellente visibilité. Parfois même dans certains autocars allemands (Néoplan) ils sont disposés sur deux étages.

De plus, dans des véhicules de grand tourisme on trouve cuisinette, penderie, lavabo, bar. La conception même des deux carrosseries interdit de faire passer en fin de carrière un autocar de tourisme (avec vastes soutes et plancher haut) dans le service autobus (plancher bas).

Les autobus, urbains ou suburbains, sont tous fabriqués par les constructeurs eux-mêmes (Saviem et Berliet en France, Kässbohrer, Mercedes en Allemagne, Leyland en Angleterre, Fiat en Italie, Pegaso en Espagne ; Ikarus en Hongrie, Scania et Volvo en Suède).

Différentes formules (petits véhicules à vingt-quatre places, autobus à étage, autobus articulés) sont essayées.



Fig. III-3 — Autocar de tourisme, avec soutes à bagages ouvertes (*Saviem*)

Le Berliet à étage construit pour la ville de Paris n'a pas rencontré le succès des bus londoniens (revendus parfois d'occasion en Espagne). Les Français répugnent à monter au premier étage, les rues ne doivent pas être bordées d'arbres, la chaussée ne peut être bombée. Bref, la formule n'a pas plu. On comprend que le carrossier ne peut, sans moyens industriels considérables, se lancer dans cette fabrication de relative grande série, assez pauvre en aménagements et rustique quant aux sièges alors qu'une tendance inverse se manifeste. À Caen ont été mis en service des bus Saviem comportant moquette, tissu de couleurs gaies sur les sièges (et non revêtements plastiques). Les autorités municipales essaient de ramener à l'autobus une clientèle qui préférait utiliser sa voiture particulière. Une carrosserie intelligente contribuera peut-être ainsi à réduire l'engorgement des villes.

L'autocar, lui, est du domaine du carrossier. Le transporteur a des idées précises : il est un peu aujourd'hui comme l'automobiliste fortuné d'avant 1914. Le « sur-mesure » en autocar concerne aussi bien le nombre et le type des sièges que la climatisation, l'installation de toilettes, la sonorisation (radio, lecteur de cassettes, microphones, haut-parleurs), la qualité des glaces (feuilletées, trempées, teintées), le système des portes (s'ouvrant en portefeuille, battantes ou à glissières) l'aménagement et le capitonnage des soutes. Il s'applique aussi parfois à la forme extérieure du car et toujours aux découpes, aux peintures, aux revêtements latéraux intérieurs, aux éclairages intérieurs. En ce cas, l'autocar, doit être livré au carrossier, comme jadis les automobiles, sous forme de châssis-poutre avec, en place, les éléments mécaniques (éprouvés au banc et essayés sur route) et le poste de conduite avec tous les instruments de la planche de bord.

Néanmoins, là aussi une tendance se dessine ; les constructeurs conçoivent et fabriquent leurs propres carrosseries. Le client n'a ainsi affaire qu'à une seule firme. La liste des options disponibles est maintenant telle que le constructeur offre pratiquement tout ce que propose le carrossier.

Une autre tendance est l'apparition de carrosseries d'autocars autoportantes, directement établies par le carrossier lui-même. Le procédé a été inventé par Kässbohrer, installé à Ulm depuis le XIXᵉ siècle. Il a été appliqué aux Lancia-Lambda en 1928 et aux autocars (qui portent le nom Setra) après la seconde guerre mondiale. Entièrement réalisé en tubes soudés, l'assemblage offre une solidité et une résistance auxquelles ne peuvent prétendre des carrosseries classiques d'autocar montées sur longerons. La légèreté des carcasses est telle que six hommes portent facilement un tel assemblage en treillis sur lequel il n'y a plus qu'à souder les panneaux et le pavillon. Dans ce cas précis le carrossier est un véritable maître d'œuvre : il conçoit d'abord la structure du véhicule, la réalise et monte lui-même moteurs, ponts, boîtes de vitesses, directions et suspensions.

Il y a là une technique et surtout une philosophie de la carrosserie : établir en premier lieu l'architecture du véhicule diffère notablement de la simple installation d'une caisse, si luxueuse soit-elle, sur une plate-forme établie par le constructeur.

4. LES CARROSSERIES DE CAMIONS

Généralement le constructeur livre le « châssis-cabine » sans carrosserie. Point n'est question ici de structure autoportante ou de coque. Les transporteurs ont des besoins multiples selon le tonnage envisagé, l'itinéraire habituel, le type de marchandises. Du camion porteur en fourgon à la semi-remorque attelée à un tracteur, les variantes sont infinies, pouvant comporter toutes les carrosseries de camion-porteur. Le champ d'action des carrossiers est ici immense et l'on comprend qu'ils se soient presque tous reconvertis dans des spécialités « poids lourds », le constructeur lui-même ne pouvant présenter toutes les variétés de carrosseries demandées par les utilisateurs.

Pour les autocars, comme pour les camions remorques et semi-remorques, l'aérodynamisme ne présente plus aucun intérêt. Pour les autocars, il s'agit d'offrir le maximum de visibilité et d'espace intérieur ; pour les véhicules lourds il faut donner le plus grand volume possible. Dans les deux cas la forme cubique répond à cette exigence. C'est pourquoi les autocars à proue inclinée et à poupe arrondie et les cabines d'utilitaires en coupe-vent sont si démodés. D'ailleurs à 60, 75, 80 ou 90 km/h la résistance de l'air n'a pas d'importance et dans ces catégories, la rentabilité n'est pas influencée par une consommation supplémentaire de deux litres de gasoil par 100 km.

Il faut également signaler une nouvelle tendance : la carrosserie à monter soi-même (le kit) pour les véhicules

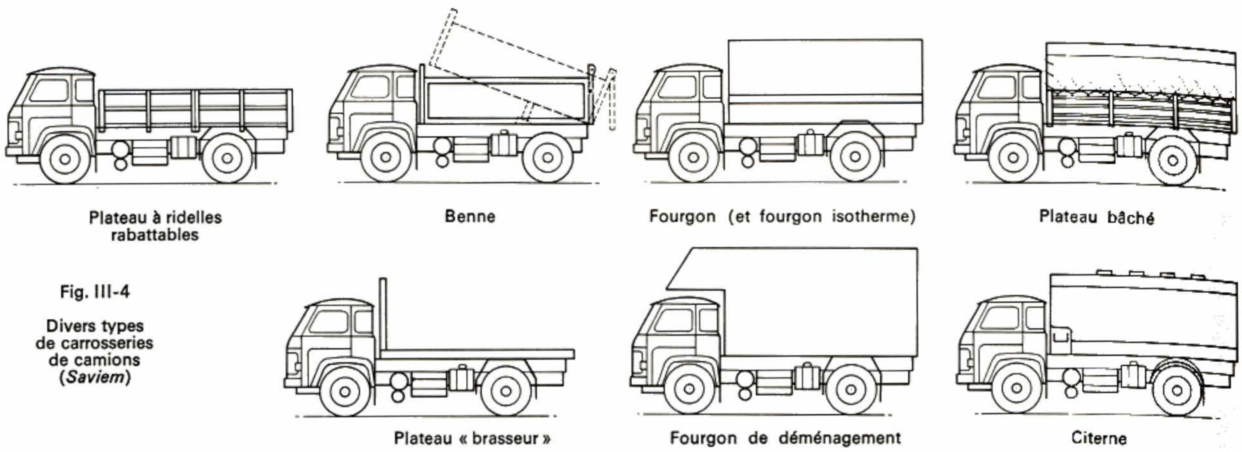


Fig. III-4
Divers types de carrosseries de camions (*Saviem*)

utilitaires. La mode est venue des États-Unis d'Amérique : pour une carrosserie bien déterminée (le fourgon, par exemple) sont proposés des éléments plats et nervurés. Le carrossier ou même le transporteur peut les assembler. L'absence de tout élément arrondi ou profilé simplifie considérablement le montage et comme le matériau est un alliage léger il est superflu de le peindre. C'est en quelque sorte la technique du conteneur à monter soi-même.

On va même plus loin et les constructeurs de conteneurs (il existe de véritables chaînes où sont assemblés les conteneurs en acier, en aluminium, en contreplaqué ou en matières plastiques) voient parfois leur matériel détourné de son objectif : le conteneur fait pour être chargé, déchargé, manutentionné de camion en wagon ou en bateau, donc matériel essentiellement mobile, est placé et vissé à demeure sur les longerons de certains poids lourds. Il remplace économiquement une carrosserie qu'il eût fallu établir à la demande.

5. LA CARROSSERIE D'AUTOMOBILES

La carrosserie est un élément majeur au point de vue commercial. Une excellente voiture, dont la ligne sera disgracieuse, se vendra mal à moins d'être un outil de travail rustique et sans prétention (telle la 2 CV Citroën). Au contraire une carrosserie très réussie, un coupé d'allure sportive, pourra être un succès à la vente, même si sa tenue de route, sa direction, son confort sont inférieurs aux qualités de ses concurrentes.

En ce sens les limitations de vitesse pénalisent les voitures stables, bien équilibrées aux directions précises et sûres. L'usager estime, à tort, qu'à la vitesse de 100 km/h il est en pleine sécurité et la ligne, le confort, les gadgets lui importent beaucoup plus maintenant que la performance mécanique qui lui apporte justement la sécurité nécessaire. Cela explique que la carrosserie ait repris la première place comme argument publicitaire de vente d'une automobile.

5.1. Conception et architecture. — Il faut souligner de nouveau qu'on ne peut plus désormais séparer carrosserie et mécanique. Au départ de toute étude il y a l'idée. Il s'agit d'étudier un coupé, une berline, un break pour deux, quatre ou sept personnes.

La famille française (le père, la mère, deux enfants), les jeunes, les sportifs sont des paramètres qui vont établir le cahier des charges. La fiscalité détermine, ainsi que les taux d'assurances des « créneaux » favorables. Les catégories efficaces sont 1 100, 1 200, 1 300 cm^3 pour la grande majorité des automobilistes, 600 cm^3 pour la voiture de ville, 1 600 à 2 000 cm^3 pour les grandes routières.

L'originalité est un facteur de vente. La cinquième porte de la Renault 16 autorise le transport d'objets encombrants. Les coupés 2 places avec une banquette étroite (dits 2 + 2) ne permettaient guère le transport de bagages ; la formule trois portes (deux portes latérales + 1 grand hayon vitré) les rend très pratiques. Sans les progrès réalisés par les manufactures de glaces, une telle carrosserie eût été irréalisable il y a 10 ans.

Fig. III-5 — Étude de style pour un poids lourd (tracteur et semi-remorque) (*M. Vioche*)

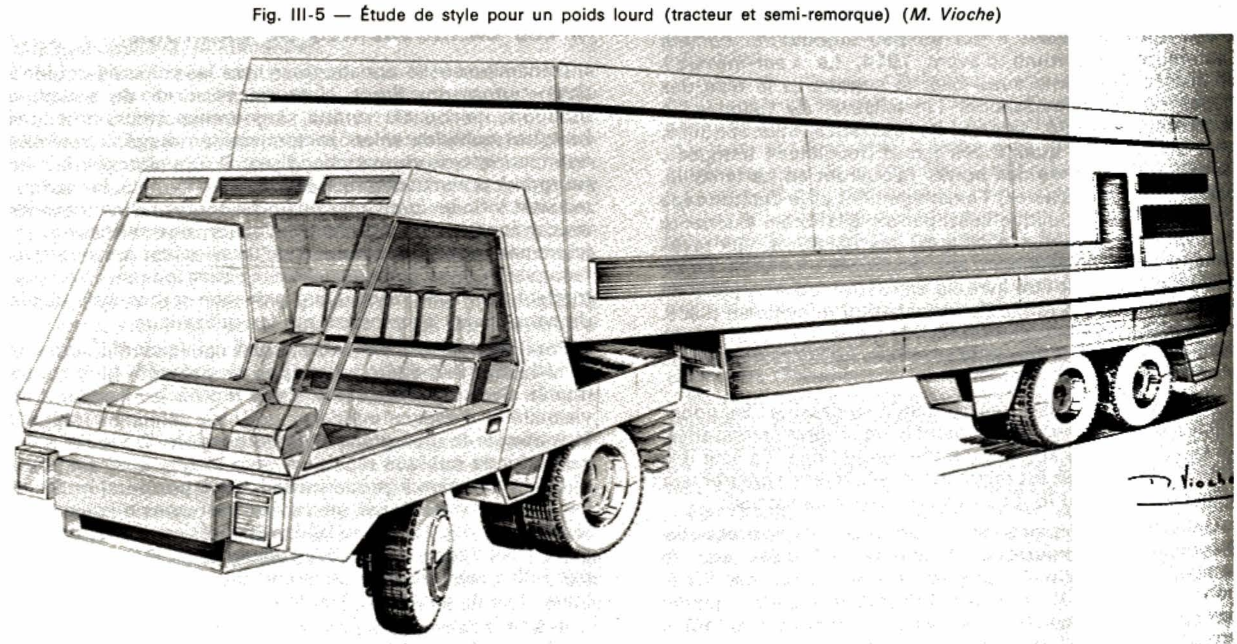




Fig. III-6 — Intérieur de la Simca-Matra Bagheera comportant trois places côte à côte (*Chrysler France*)

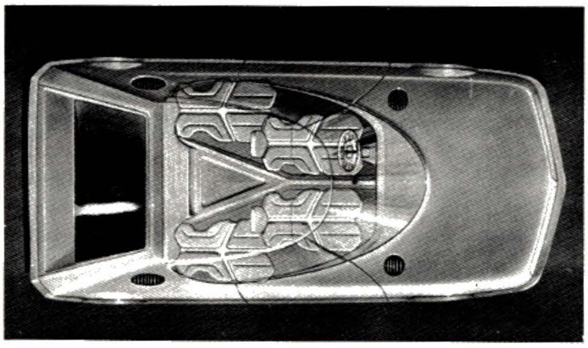


Fig. III-7 — Perspective en gouache d'un coupé 4 places NSU (*Bertone*)

La catégorie étant choisie suivant les indications du service de prospection qui a fourni, après sondages, le maximum d'indications, le bureau d'études jette sur le papier les premiers croquis en tenant compte des servitudes imposées financièrement :

— utilisation d'outillage existant (presses, machines-transfert) ;

— étude des modèles concurrents, recherche de l'originalité tout en restant dans les mêmes prix ;

— utilisation d'organes mécaniques existant dans la gamme (moteurs, boîtes de vitesses, directions, transmissions, suspensions). Ce jeu d'assemblage est devenu courant et il devient rare qu'une voiture soit entièrement nouvelle.

— la disposition de ces organes et en particulier du moteur, placé en avant, en arrière (ce que l'on abandonne de plus en plus) ou au centre, longitudinalement ou transversalement va déterminer une implantation.

Ainsi, la Simca-Matra Bagheera est née de l'idée de mettre le moteur 1 300 cm³ au centre ce qui, sous peine d'allonger sensiblement la voiture, ne permet d'implanter que deux places. Or, tous les services de prospection le confirment, une voiture deux places se vend très difficilement. Simca-Matra a donc disposé trois places de front, ce que Panhard, jadis, avait déjà fait, sur la « Dynamic » mais en mettant le conducteur au milieu des trois places.

5.2. L'idée traduite en grandeur réelle. — Rien n'est plus trompeur qu'une perspective au crayon, à la gouache ou au lavis. « Une perspective est toujours faite de chic, elle fausse la vision du technicien, du commerçant, de l'utilisateur ; le styliste s'est fait plaisir » nous dit Michel Vioche, esthéticien industriel.

On dispose donc le moteur, la boîte, le pont, la direction, le volant, les roues, les sièges à leur emplacement réel et la maquette se fait en grandeur avec du bois et du fil de fer. On doit pouvoir entrer, sortir, s'asseoir, voir dans de bonnes conditions. Cette maquette grandeur (1/1) a parfois été précédée d'une réalisation au 1/5 en dessin mais c'est sur la maquette fil de fer (1/1) qu'a lieu la première discussion avec l'état-major de la société.

L'impression étant favorable, un complément d'enquête est décidé, puis commencent les études de style proprement dites ; y participent les dessinateurs de la firme et parfois des bureaux de style étrangers. Les dessins sont fournis en grandeur (1/1). Une seconde réunion de l'état-major permet de choisir l'un des dessins.

5.3. Réalisation de la maquette. — D'après les éléments du dessin choisi (profil, faces avant et arrière, vue en plan) une maquette en plâtre ou en araldite est réalisée, toujours à grandeur réelle.

On travaille donc à l'échelle 1/10 pour les tous premiers croquis et ensuite on respecte l'échelle 1/1. Certains constructeurs, carrossiers et stylistes refusent de travailler à l'échelle 1/2. D'après eux l'impression serait faussée : certains éléments pourraient passer pour être en grandeur réelle, tel le volant qui est maintenant beaucoup plus petit sur les voitures.

Quant à la maquette à l'échelle 1/5, des techniciens affirment qu'en soufflerie, elle donne de faux résultats ;



Fig. III-8

Ébauche d'un modèle de voiture à l'échelle 1/4 ; au mur, diverses études de style (*Volkswagen*)

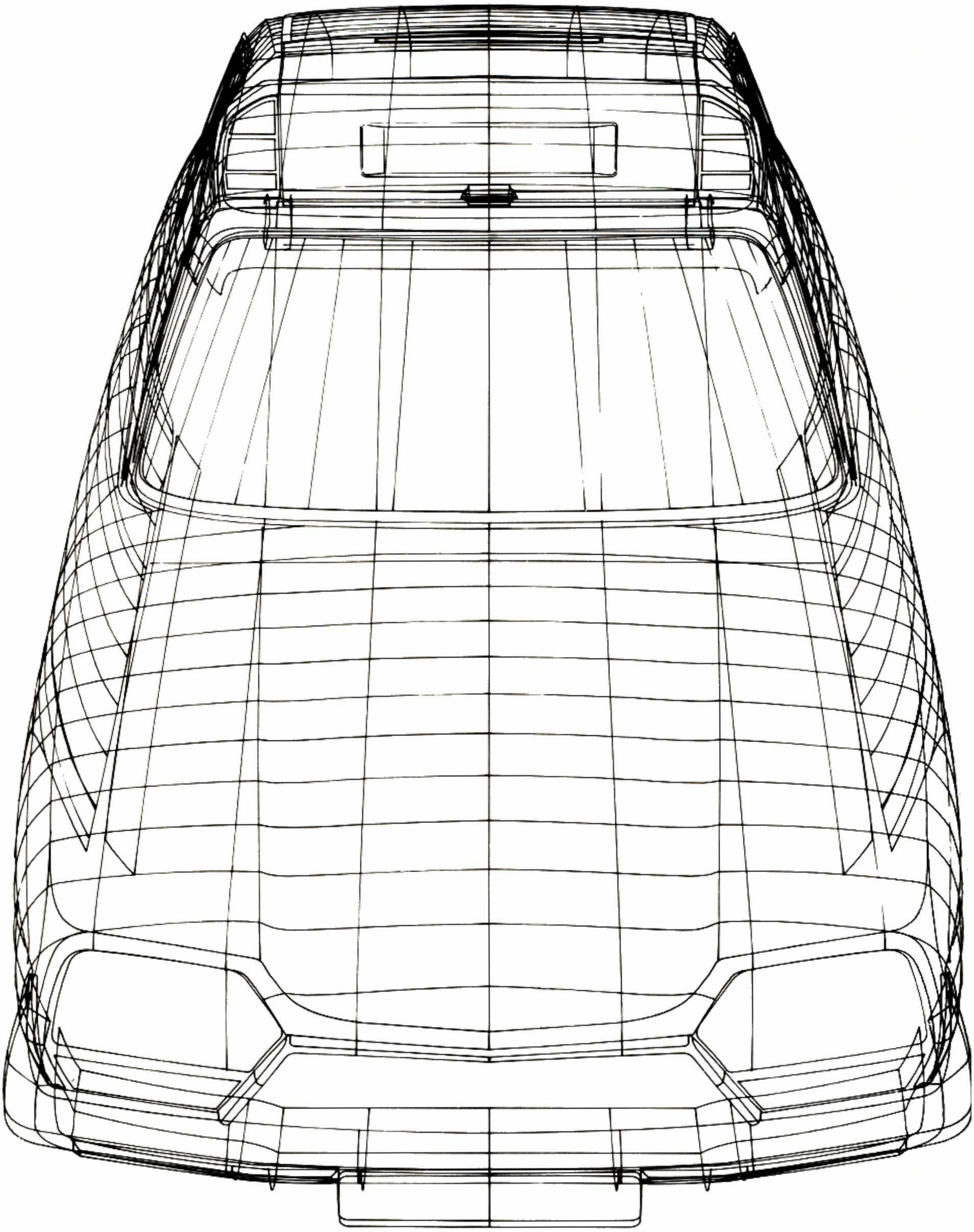


Fig. III-9 — Tracé obtenu par une machine Gerber de Hartford (États-Unis d'Amérique), simulant une vue plongeante sur une GS : le dessin a été établi en vingt minutes à partir d'une maquette en araldite. Cette machine a une capacité de six mètres sur un mètre cinquante et peut dessiner en perspective les lignes générales, les sections, les détails de carrosserie ; sa tête traceuse est commandée par un calculateur Honeywell Bull utilisant les bandes perforées de l'Alpha 3 D (*Citroën*)

les orifices de refroidissement du moteur et d'aération de l'habitacle sont, disent-ils, difficiles à reproduire exactement à cette échelle. Pourtant, chez Citroën la véritable genèse de la carrosserie de la GS fut fondée sur les essais aérodynamiques en soufflerie (1).

Les mesures en soufflerie sont visualisées au moyen d'un certain nombre de procédés, fils de laine et fumée qui montrent l'écoulement de l'air autour de la carrosserie. Expérimentés sur les voitures de course, les jupes avant, les becquets, les ailerons stabilisateurs ont maintenant leur place sur les voitures de série (Opel, Renault TX, BMW, Porsche). Ils ont pour but de plaquer la voiture au sol, d'augmenter ainsi l'adhérence et d'empêcher certains phénomènes de portance à grande vitesse sur des voitures disposant d'un carénage inférieur.

Durant toute l'étude, des maquettes à l'échelle 1/5 aux maquettes en grandeur réelle, la liaison est constante avec les ingénieurs, les bureaux d'études, les services commerciaux. L'esprit d'équipe est la clef du succès.

5.4. De la maquette en plâtre aux prototypes. — Lorsque la maquette en plâtre ou en araldite est terminée, elle est poncée, polie, peinte au pistolet, polie à nouveau, garnie de roues, de glaces, de projecteurs, de poignées. Une maquette d'habitabilité l'accompagne avec des portes, des sièges, un volant, un tableau de bord. Une troisième réunion de l'état-major se tient alors pour examiner cette maquette et envisager les retouches éventuelles. Il s'agit ensuite d'établir les plans et de passer à la réalisation des prototypes.

Pendant longtemps le relevé de toutes les cotes de la maquette en grandeur réelle se faisait par de fastidieux calculs et tracés en géométrie descriptive. Ces travaux se font désormais à l'aide de machines à relever en deux et trois dimensions. L'introduction de l'ordinateur dans le calcul des formes de carrosserie réduit considérablement le temps des études et des relevés. On compte en effet 25 000 mesures pour traduire en plans une maquette en grandeur réelle. En outre, le tracé des lignes de lumière qui doivent filer en continu dans tous les plans peut être corrigé automatiquement par l'ordinateur.

Si la recherche des formes et la synthèse sont le domaine des techniciens en carrosserie, la détection de certains défauts locaux de quelques dixièmes de millimètres, imperceptibles à l'œil, est réalisable directement par la machine. L'ordinateur permet également de réaliser certaines études particulièrement difficiles sans son aide : ouverture d'une porte qui n'existe encore que sur la maquette en plâtre, calcul des débattements et des braquages de roues, vérification de la proximité des organes, tracés des zones de visibilité, des zones de balayage des essuie-glace.

Néanmoins, les concepteurs vérifient une dernière fois les formes générales de la carrosserie. Pour cela la maquette en plâtre est transportée loin de toute machine électronique, loin de toute forme géométrique, en pleine nature, en forêt, par exemple. C'est la dernière critique de l'homme avant que la maquette ne soit totalement livrée à l'ordinateur.

(1) La résistance opposée par l'air à l'avancement de toute surface ou de tout volume est pour l'automobile un obstacle à la vitesse et la cause d'une augmentation sensible de la consommation de carburant (on estime que pour un véhicule automobile non profilé la puissance exigée pour pénétrer dans l'air est égale à celle nécessaire à la poussée ou à la traction à 70 km/h).

La formule est bien connue ; nous la rappellerons :

$$R_a = \frac{1}{16} C_x S V^2$$

C_x est le coefficient de forme, de polissage des surfaces, d'absorption d'air par la calandre, les orifices de climatisation et de refroidissement des freins. Les jupes, les spoilers disposés à l'avant des voitures et les ailerons stabilisateurs ont une influence importante sur C_x.

S est la surface en mètres carrés du maitre-couple du véhicule.

V est la vitesse en mètres par seconde.

Le coefficient C_x se mesure en soufflerie sur maquettes au 1/5, au 1/10 ou si possible à grandeur réelle — ou bien par hampe dynamométrique reliant le véhicule à tester à un véhicule pousseur — ou bien encore par lancement de véhicules carrossés différemment et mis en roue libre (moteur désaccouplé) et en mesurant chacune des distances parcourues.

Quelques exemples :

— une proue et un pare-brise verticaux et plats (camion ou tracteur routier) : $C_x = 1,2$

— voiture de course : $C_x = 0,12$ à $0,18$

— coupé sport Datsun 240 Z : $C_x = 0,34$

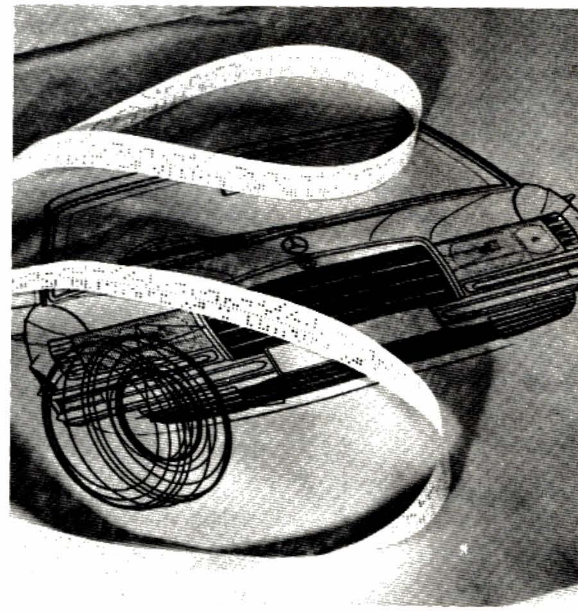


Fig. III-10 — Tracé obtenu par ordinateur : ici il a calculé l'enveloppante correspondant à un type de pneu mémorisé, pour la détermination d'un passage de roue guidée et suspendue (*Daimler-Benz*)

En possession de tous les plans tracés et vérifiés par l'ordinateur les études vont se répartir en trois groupes que l'on ne peut dissocier :

— Études « carrosserie » : plan de forme, structures, accostages des éléments, outillages nécessaires.

— Études « mécanique » : suspension, direction, freins, transmission, commandes, réservoir, refroidissement.

— Études « garnissages » et « électricité » : sièges, tableau de bord, faisceau électrique, équipement électrique.

Durant ce temps et parallèlement sont construits les prototypes mécaniques (ce qu'en argot d'usine on appelle les « mulets ») et qui ont pour but de tester le refroidissement le freinage, la tenue de route.

5.5. Les prototypes. — Ces prototypes vont être soumis à des essais très difficiles. Chez Simca-Matra, par exemple, douze prototypes Bagheera ont été construits : un pour l'étude du freinage, un pour le refroidissement, trois pour des tests d'endurance sans répit, deux pour des essais de « crash » contre des obstacles à des vitesses variées. En ce qui concerne les autres on peut préciser que deux ont été présentés au Service des Mines, un a permis de parachever les derniers détails de carrosserie, deux ont été gardés pour la présentation à l'état-major de la maison.

La lutte contre la montre commence dès le premier coup de crayon, « l'idée ». Sept à douze mois plus tard, si l'on utilise des éléments mécaniques existants, la maquette en araldite peut être prête. Il faut deux ans pour que les plans soient établis, les prototypes testés et que la présérie commence.

Si les organes mécaniques sont entièrement nouveaux, le département carrosserie aura des délais plus longs car les études vont être réparties sur cinq années environ.

6. LES MATÉRIAUX

Si le styliste ne doit pas penser uniquement « plan » mais « volume », dès le premier coup de crayon il doit également avoir présent à l'esprit la matière dans laquelle seront réalisées les formes qu'il conçoit. Le temps est révolu où la tôle et les entretoises constituaient l'essentiel de la caisse. Aujourd'hui on peut dire que le cahier des charges et les études de marché vont directement influencer les formes et la ligne générale de la voiture.

S'il est prévu de sortir une série d'au moins cinq cents voitures chaque jour, la tôle d'acier Martin au carbone, subissant bien emboutissage et pliage, est tout indiquée.

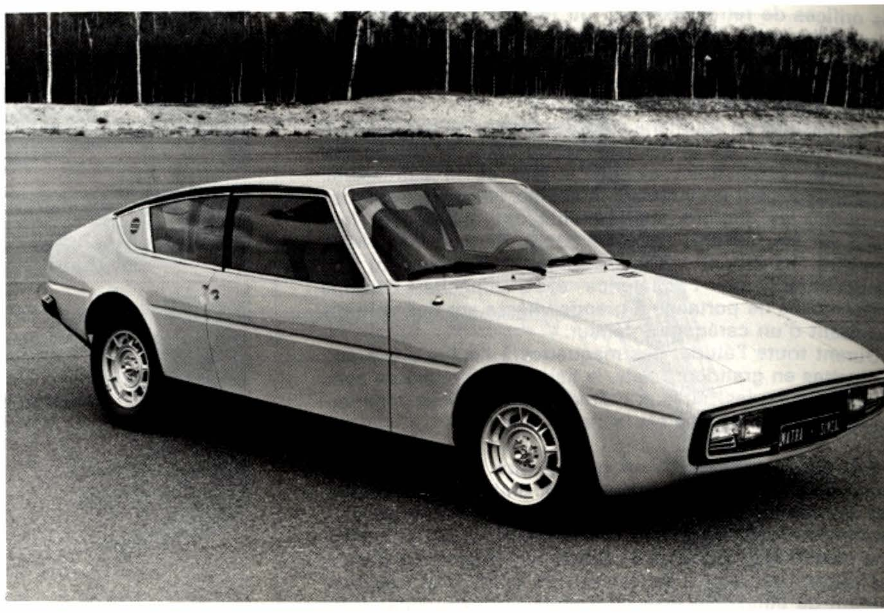


Fig. III-11

Prototype de la « Bagheera » Matra-Simca (*Chrysler France*)

Si la série ne doit pas dépasser trois à cinq exemplaires par jour, il n'est pas question de travailler avec de gros outillages comme pour la grande série ; le polyester est alors le matériau de base. Les assemblages et les formes seront différents, le style aussi car il est plus facile d'obtenir certains volumes arrondis avec le polyester qu'avec la tôle.

D'autres impératifs vont se révéler ; par exemple, à cause du salage des routes par les Ponts et Chaussées durant l'hiver, les constructeurs de poids lourds ont établi au dos des cabines de camions de véritables tubes d'aspiration d'air non salé et les soubassements non portants sont de plus en plus réalisés en plastique.

Les normes de sécurité elles-mêmes influencent le style ; les voitures comportent des structures de résistance différenciée à l'avant et à l'arrière, l'habitacle lui-même étant la partie la plus rigide. Le bois a totalement disparu des montants de carrosserie et des tableaux de bord tant les échardes sont dangereuses en cas d'accident. Les alliages légers, l'aluminium, le caoutchouc ont des fonctions bien définies. On utilise même le carton pour des planches de bord (ce qui est bien dangereux au-dessus des faisceaux électriques qui sont rassemblés au tablier). Les réservoirs d'essence peuvent être en caoutchouc synthétique et sont placés plus commodément sous les carrosseries, à l'abri des impacts. La part du cuivre est minime dans la carrosserie, sauf lorsqu'il s'agit de climatiser entièrement une voiture ; en plaques plus ou moins épaisses il est alors appelé à isoler certaines parties telles les planchers.

Les garnissages des planchers, des sièges, des parois latérales et du pavillon font appel aux tapis de sol et aux moquettes spécialement traitées pour résister à l'humidité, aux tissus plastiques et à la laine. Le plastique a le grave inconvénient d'être froid l'hiver et très chaud l'été (ce serait en grande partie à cause de l'échauffement du dos contre le siège gainé de plastique que les automobilistes méditerranéens, italiens principalement, répugnent au port de la ceinture de sécurité). De plus, celui-ci peut être enflammé par une cigarette, ce qui n'est pas le cas avec la laine.

Au contraire, le plastique stratifié, léger, solide, bon marché par rapport aux autres éléments porteurs utilisés dans la carrosserie, permet d'établir des tableaux de bord, des consoles, des galeries, des orifices de custode pour l'évacuation de l'air vicié.

Les glaces ont fait des progrès considérables. On peut aujourd'hui établir un hayon (pour le chargement par l'arrière) d'une seule pièce et sans encadrement métallique, les charnières et la fermeture étant installées par perçage de la glace. Jamais les coupés trois portes tels que la Bagheera, les BMW Touring, la Saab n'auraient pu être

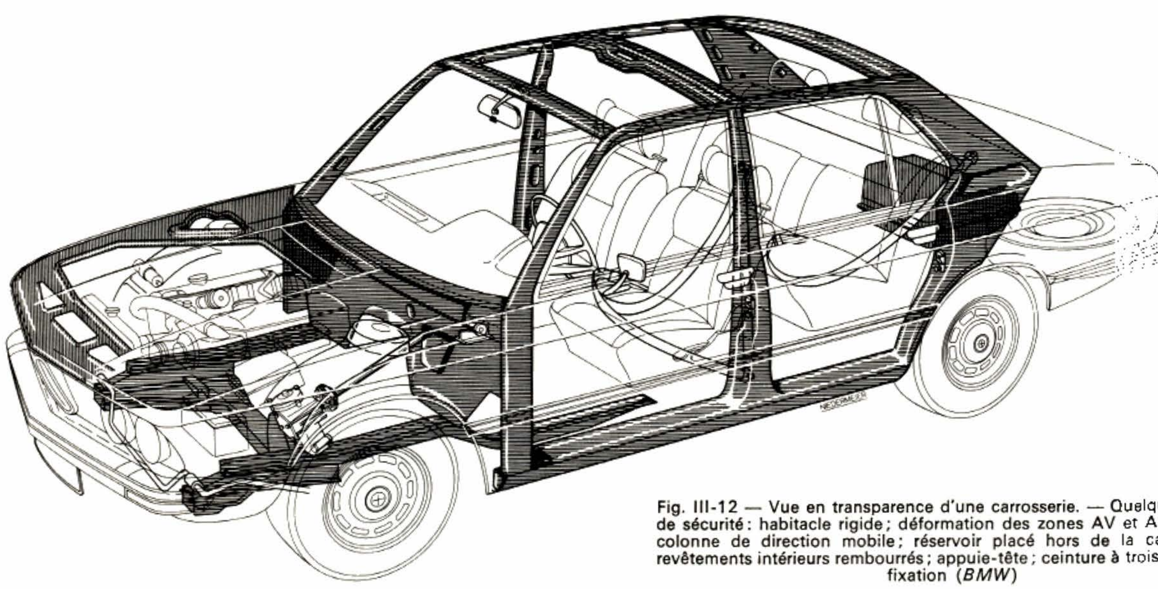


Fig. III-12 — Vue en transparence d'une carrosserie. — Quelques points de sécurité : habitacle rigide ; déformation des zones AV et AR limitée ; colonne de direction mobile ; réservoir placé hors de la carrosserie ; revêtements intérieurs rembourrés ; appuie-tête ; ceinture à trois points de fixation (*BMW*)



Fig. III-13

Places avant d'un coupé SM (*Citroën*)

réalisés en série sans les matériaux qu'offrent maintenant les glaceries.

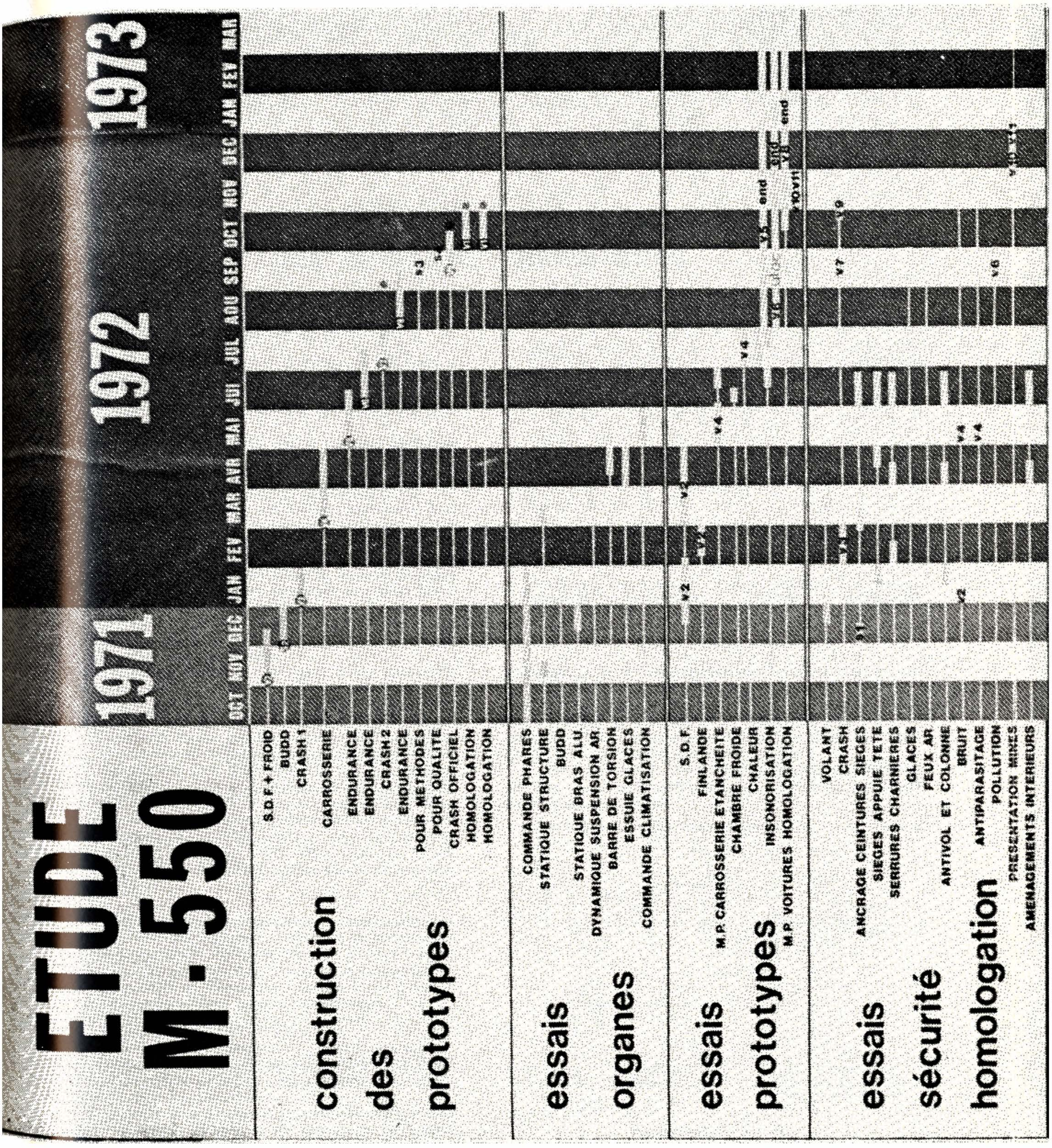
Les verres de pare-brise sont soit en verre trempé, soit en feuilleté. Les constructeurs de voitures à hautes performances proposent généralement, en option, les pare-brise feuilletés qui offrent une grande sécurité en cas de collision. Les glaces latérales, la vitre arrière et le pare-brise peuvent être en verre teinté, ce qui, physiologiquement, est très reposant pour l'œil.

L'art du carrossier est d'ailleurs de connaître parfaitement l'ergonomie. On doit pouvoir, par exemple, atteindre toutes les commandes et spécialement la poignée du frein à main lorsque la ceinture de sécurité est bouclée. La hauteur sous pavillon, la position au volant, la relaxation des passagers à l'avant et à l'arrière doit être aussi facile pour tous les individus, qu'ils mesurent 1,55 m ou 1,85 m.

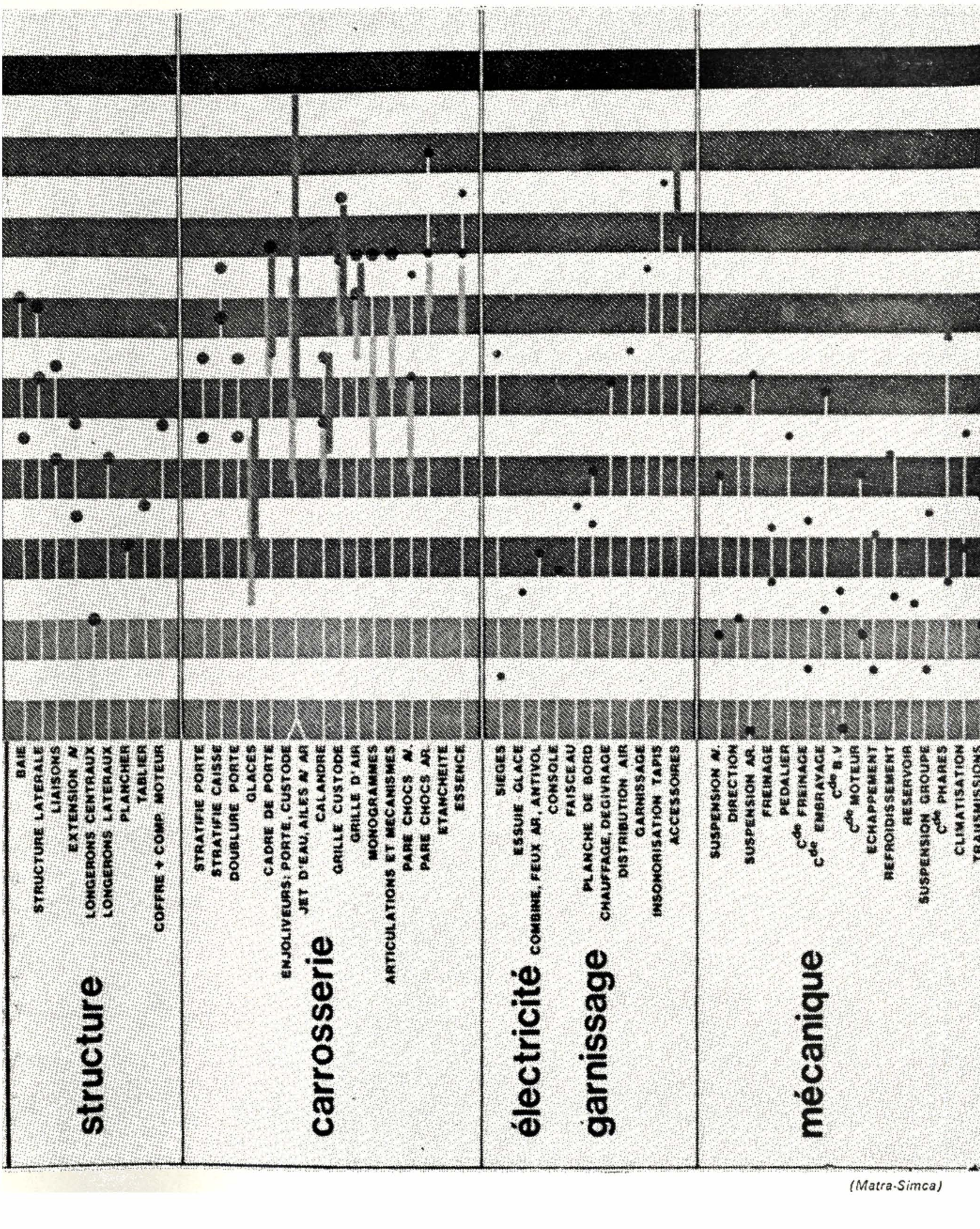
La psychologie elle-même ne doit pas être étrangère au carrossier et au styliste. Les intérieurs noirs sont une mode venue des postes de pilotage d'avion. S'il n'est pas indiqué d'avoir une planche de bord blanche, du fait des reflets dans le pare-brise, en revanche les cabines de poids lourds, où les chauffeurs sont en poste 8 et 9 h par jour sont maintenant de couleur crème ou blanche (le noir les portait à la neurasthénie).

Ainsi, par le développement considérable de l'automobile, établir un habitacle ou une carrosserie nécessite de connaître l'esthétique, les règles de sécurité active et passive, la psychologie des usagers, l'ergonomie, la physiologie. Le rôle du styliste ne se termine que lorsque la voiture est entre les mains du client et qu'il connaît enfin ses réactions parfois imprévisibles.

Exemple de calendrier d'étude d
la Matra-Simca I



’une voiture automobile : Bagheera



(Matra-Simca)

LE MOTEUR

CHAPITRE IV

HISTORIQUE ET PRINCIPE DES MOTEURS THERMIQUES

1. MOTEURS À COMBUSTION INTERNE À PISTON À MOUVEMENT ALTERNATIF

Le moteur à combustion interne à piston est très ancien, au moins dans ses principes, et, exception faite de la machine à vapeur, il est difficile de trouver actuellement des réalisations techniques aussi près des idées générales conçues il y a un siècle.

C'est en effet en janvier 1862 que le Français Alphonse Beau de Rochas, ingénieur des chemins de fer de Provence, obtient un brevet pour le cycle à quatre temps avec compression préalable, universellement appliqué de nos jours.

Quelques années plus tard en 1876, l'Allemand N.A. Otto réalise le premier moteur thermique fonctionnant selon le cycle Beau de Rochas.

Avec les Français Hugon et Lenoir apparaît en 1860 le moteur à deux temps, à un seul cylindre, mais la première application de la compression préalable au cycle deux temps sera due, en 1879, à Dugald Clerk.

Les moteurs à combustion interne qui sont alors fabriqués fonctionnent aux gaz de hauts fourneaux ou à l'essence de pétrole avec allumage par étincelle.

Un autre type de moteur va naître des travaux de Rodolphe Diesel qui essaie, tout d'abord, d'appliquer le cycle de Carnot à la réalisation d'un moteur alimenté en poussier de charbon. Celui-ci est injecté dans une atmosphère portée à une température élevée par compression et il doit s'enflammer spontanément au fur et à mesure de son introduction. Les travaux entrepris par l'inventeur, avec la collaboration des ingénieurs de la société Krupp, aboutiront en 1897 au moteur Diesel tel qu'on le connaît aujourd'hui. Ainsi apparaissent les moteurs à combustion interne à deux ou à quatre temps, à allumage commandé ou allumage par compression, dont les réalisations successives, depuis un siècle, aboutiront aux machines perfectionnées que nous connaissons aujourd'hui.

1.1. Les cycles à quatre temps et à deux temps. — On appelle *cycle*, l'évolution en pression et en température de la masse gazeuse à l'intérieur d'un cylindre de moteur thermique. Le renouvellement de la masse gazeuse s'effectue tous les deux tours de vilebrequin dans le cycle à quatre temps et à chaque tour dans le cycle à deux temps.

1.1.1. Cycle à quatre temps (fig. IV-1)

— Premier temps : admission de la masse gazeuse pendant la course descendante du piston ; durant cette phase le cylindre est ouvert au milieu extérieur par l'orifice d'admission (soupape en général).

— Deuxième temps : dans sa course ascendante le piston comprime la masse gazeuse après fermeture de l'orifice

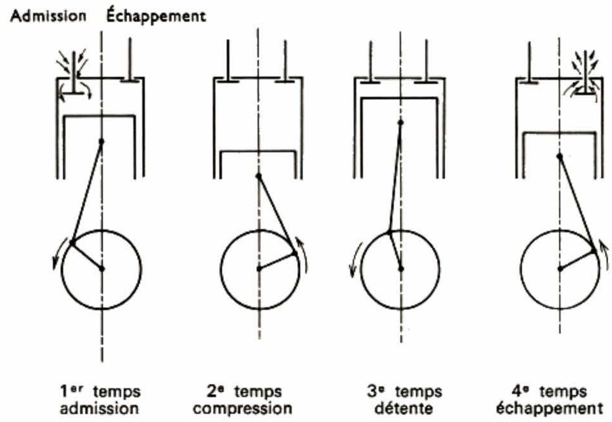


Fig. IV-1 — Cycle à 4 temps

d'admission. En fin de compression l'inflammation du gaz est réalisée par l'étincelle d'allumage.

— Troisième temps : les gaz sont portés à une température élevée par la combustion et la pression s'élève dans le cylindre. Durant la course descendante, le piston reçoit l'effort correspondant à la détente des gaz.

— Quatrième temps : l'orifice d'échappement est ouvert ; dans sa course ascendante le piston refoule les gaz brûlés à l'extérieur du cylindre.

1.1.2. Cycle à deux temps (fig. IV-2). — Le cycle à

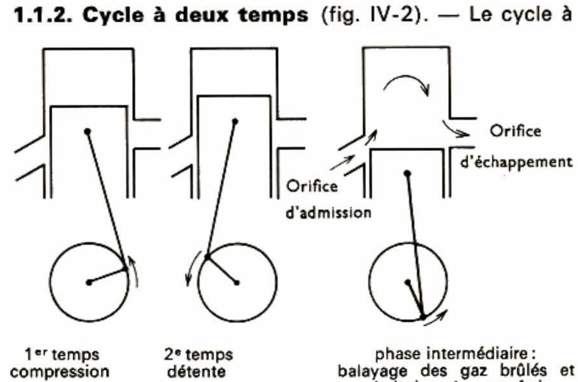


Fig. IV-2 — Cycle à deux temps

deux temps comporte les quatre phases du cycle à quatre temps mais à la différence de ce dernier qui se reproduit tous les deux tours, le cycle à deux temps s'effectue en un tour de vilebrequin (V. chap. 30).

Les phases d'admission et d'échappement de la masse gazeuse ont lieu très rapidement et presque simultanément entre la fin de la détente et le début de la compression. À la différence du cycle à quatre temps, les phases d'admission et d'échappement ne sont pas toujours directement engendrées par le mouvement du piston et nécessitent dans certains cas l'apport d'une soufflante de balayage.

— Le premier temps est celui de la compression en fin de laquelle débute l'inflammation du gaz.

— Le deuxième temps est celui de la détente.

1.2. Classification des moteurs à combustion interne à piston

1° *Moteur à allumage commandé.* — C'est le type de moteur le plus couramment utilisé pour la propulsion des véhicules automobiles et des motocycles.

Si les moteurs à quatre temps sont généralement appliqués à l'automobile, les motocycles utilisent pour leur propulsion des moteurs à quatre temps ou à deux temps.

La gamme de puissances des moteurs à allumage commandé se situe entre quelques dizièmes de cheval et 1 000 chevaux (1 ch = 735 W).

Le fonctionnement du moteur à allumage commandé repose essentiellement sur le mélange préalable du combustible et du comburant et sur la nature de la combustion du mélange carburé.

Sans anticiper sur l'étude de la carburation et de la combustion, nous pouvons dire en effet que le dégagement d'énergie thermique dans le moteur à allumage commandé, tient d'abord à la préparation d'un mélange de combustible et de comburant. Il doit être correctement dosé et suffisamment homogène pour être enflammé par l'étincelle d'allumage à un moment convenable du cycle. Ensuite, à partir du noyau de mélange enflammé par l'étincelle d'allumage, un front de flamme se propage à travers la totalité du mélange contenu dans la chambre de combustion à une vitesse de quelques mètres par seconde. Nous verrons par la suite de quelle façon l'énergie thermique ainsi dégagée est transformée en énergie mécanique. Limitons-nous pour l'instant à noter que le mélange combustible-comburant est généralement composé d'un hydrocarbure et d'air atmosphérique.

2° *Moteur à allumage par compression* (moteur Diesel). — Les applications du moteur Diesel sont multiples : traction routière et ferroviaire, marine, industrie, etc.

Les puissances sont comprises entre quelques chevaux et 45 000 chevaux (35 000 kW environ), c'est dire que la gamme est beaucoup plus étendue que celle des moteurs à allumage commandé.

Les moteurs de forte puissance sont à deux ou à quatre temps. Ceux de faible ou de moyenne puissance sont à quatre temps dans la plupart des cas.

Le processus de combustion du moteur à allumage par compression est très différent de celui du moteur à allumage commandé en ce sens que le combustible est directement injecté dans le comburant préalablement porté à une température élevée par compression adiabatique. L'inflammation spontanée des premiers éléments de combustible injectés se produit après un court délai (délai d'inflammation) puis la combustion se poursuit au fur et à mesure de l'introduction du combustible dans la chambre de combustion. Nous savons que le premier moteur imaginé par Diesel devait fonctionner grâce à la combustion de charbon pulvérisé avec de l'air atmosphérique. Les difficultés présentées par l'utilisation d'un combustible aussi peu maniable conduisirent finalement Diesel à employer les hydrocarbures liquides.

2. AUTRES TYPES DE MOTEURS THERMIQUES

En raison de l'intérêt ou du regain d'intérêt que suscitent actuellement certains types de moteurs qui pourraient être qualifiés de non conventionnels par rapport aux précédents, il convient de citer :

— Le moteur à piston rotatif Wankel.

— La turbine à gaz.

Ils entrent tous deux dans la catégorie des moteurs à combustion interne.

— Le moteur Stirling.

— Le moteur à vapeur.

Ils peuvent être classés dans la catégorie des moteurs à combustion externe.

2.1. Moteur rotatif Wankel. — Dans son livre « Machine à piston rotatif » — Classification des principes de conception pour les moteurs, les pompes et les compresseurs — publié en 1963, Wankel décrit 149 types fondamentaux et mentionne d'autres versions de moteurs rotatifs.

Il semble que l'histoire de ce type de moteur remonte au XVIe siècle avec l'ingénieur italien Ramelli qui publia en 1588 un livre dans lequel il décrit des machines à piston rotatif.

Sont ensuite attachés à son évolution, les noms de : Johannes Kepler, 1760 ; James Watt, 1782 ; Galloway, 1846 ; Oldham, 1861 ; Cooley, 1901 ; Sensaud de Lavaud, 1938 ; Maillard, 1943 et enfin Félix Wankel qui commença ses travaux en 1926.

Le type standard connu du moteur Wankel est à allumage commandé et fonctionne selon le cycle à quatre temps de Beau de Rochas. Ce moteur en est encore au début de sa carrière mais le nombre de licences vendues dans le monde laisse présager un succès probable dans la mesure où il sera possible de surmonter ses inconvénients actuels et de résoudre certains problèmes techniques. Sur le plan pratique le moteur rotatif présente des avantages par rapport au moteur alternatif :

— niveaux de vibration et de bruit faibles ;

— encombrement et poids réduits.

Des tentatives ont été faites en vue d'adapter le cycle Diesel au moteur Wankel mais elles se sont heurtées jusqu'à présent à de grandes difficultés.

2.2. Turbine à gaz. — Le principe de la turbine à gaz remonte à un temps immémorial. Le premier brevet relatif à ce type de machine fut délivré en 1791 à l'Anglais John Barber.

Les noms de nombreux savants et ingénieurs sont attachés à son évolution : Dumbell, 1808 ; Bresson, 1837 ; W.F. Fernihougz, 1850 ; Stolze, 1900 ; S.A. Moss, 1902 ; R. Armengaud, 1904 ; Rateau, Charles Lemale, etc.

Les ingénieurs de Rover qui ont travaillé sur la turbine à gaz en 1940 peuvent être considérés comme des pionniers pour son application à l'automobile. Une voiture Rover équipée d'une turbine fut présentée au public en mars 1950 pour la première fois. Ce fut ensuite le tour de Ford, General Motors, Leyland, M.T.U., de s'y intéresser. Un des perfectionnements les plus intéressants, appliqués ces dernières années, est certainement l'échangeur de chaleur rotatif ou régénérateur. Celui-ci en réintroduisant dans l'air frais sortant du compresseur la chaleur qui serait perdue dans les gaz d'échappement, réduit la quantité de chaleur à fournir par la combustion. La consommation de combustible peut ainsi être réduite de moitié.

Les turbines à gaz d'automobile développent actuellement des puissances comprises entre 100 et 500 chevaux.

2.3. Moteur Stirling. — En 1816, un ecclésiastique écossais Robert Stirling breveta le moteur à air chaud. Dans les années qui suivirent, le moteur réalisé fut cependant incapable de lutter contre ses concurrents : les moteurs à vapeur, à gaz, à essence et les moteurs Diesel.

L'idée de Stirling tomba dans l'oubli jusqu'en 1938 date à laquelle elle fut reprise chez Philips. L'invention de l'entraînement rhomboïdal en 1953 permit d'atteindre la conception optimale pour le mouvement des pistons. Des améliorations essentielles : l'introduction du joint d'étanchéité à chaussette roulante et l'utilisation de segments de piston non graissés permirent récemment la réalisation de moteurs dont la durée de vie atteint 10 000 heures. Quatre sociétés ou groupes de sociétés en Europe et aux États-Unis d'Amérique s'intéressent à des moteurs Stirling susceptibles d'être utilisés comme groupes propulseurs pour des véhicules automobiles.

Principe de fonctionnement du moteur Stirling (fig. IV-3).

I. — Le piston est au point le plus bas — le balayeur est au point le plus haut — tout le gaz se trouve dans la chambre froide.

II. — Le balayeur est resté au point le plus haut — le piston a comprimé le gaz à basse température.

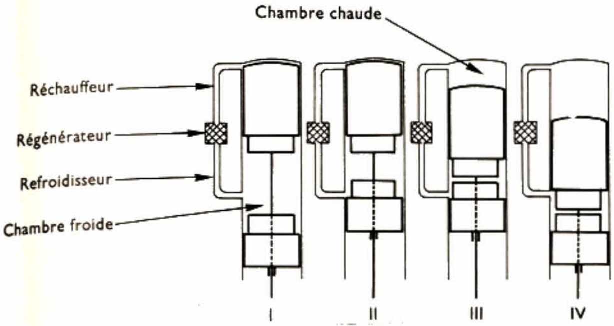


Fig. IV-3

Schéma de principe du cycle de Stirling

III. — Le piston est resté au point le plus haut — le balayeur a refoulé le gaz dans la chambre chaude par l'intermédiaire du refroidisseur, du régénérateur et du réchauffeur.

IV. — Le gaz chaud est détendu, le balayeur et le piston sont arrivés ensemble au point le plus bas. Ensuite le balayeur chasse le gaz dans la chambre froide par l'intermédiaire du réchauffeur, du régénérateur et du refroidisseur tandis que le piston reste immobile, de sorte que la position I est à nouveau atteinte.

Le gaz évoluant en circuit fermé est de l'hélium ou de l'hydrogène. L'apport de chaleur extérieur permet d'utiliser différentes sources d'énergie sans qu'il soit nécessaire d'apporter au moteur des modifications substantielles. Parmi les combustibles liquides ou gazeux utilisables on peut citer : l'alcool, diverses sortes d'essences, le mazout, l'huile de graissage, l'huile d'olive, le propane, le butane ou le gaz naturel, etc.

2.4. Moteur à vapeur. — L'histoire du moteur à vapeur remonte bien avant celle du moteur Stirling. Newcommen construisit son premier moteur à vapeur en 1712.

Il y a un peu plus de deux siècles, le 23 octobre 1769, Nicolas Joseph Cugnot, officier de l'Armée française,

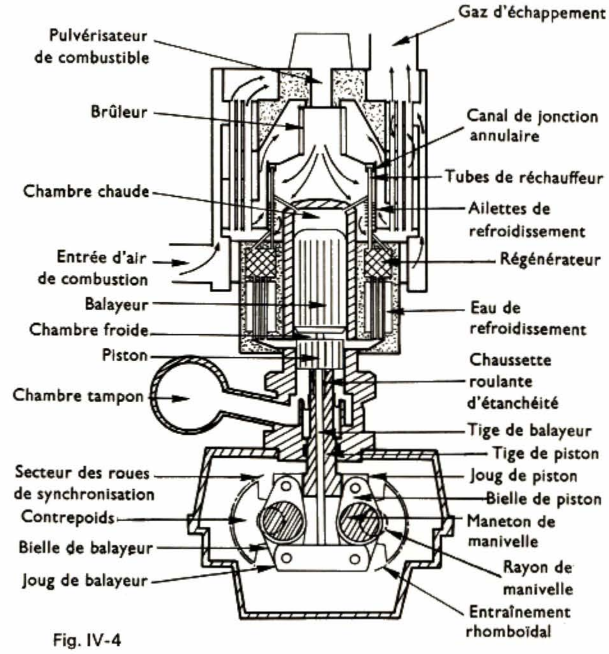


Fig. IV-4

Coupe transversale montrant les principaux éléments du moteur Stirling avec entraînement rhomboïdal

effectua un parcours à la vitesse de 4 kilomètres par heure sur le premier véhicule propulsé par ce type de moteur. Durant le XIXe siècle des voitures à vapeur furent développées et construites dans plusieurs pays du monde et, en 1887 et 1888, les voitures françaises de Serpollet et de Dion Bouton Trépardeux, qui atteignaient la vitesse de 60 kilomètres par heure, gagnèrent les premières courses automobiles. Vers la fin du siècle, ces voitures étaient plus puissantes que les premiers véhicules à moteur à combustion interne. C'est vers 1960 que l'idée du moteur à vapeur réapparut aux États-Unis d'Amérique comme solution possible du problème de plus en plus aigu de la pollution atmosphérique. La General Motors, Ford et Chrysler sont engagés dans un travail sur sa mise au point, mais les rapports émanant des trois sociétés ne sont pas très encourageants.

CHAPITRE V

THERMODYNAMIQUE ET AÉRODYNAMIQUE DU MOTEUR À COMBUSTION INTERNE À PISTON

1. CYCLES THÉORIQUES

Nous avons vu en quoi consiste les principaux cycles utilisés en matière de moteur. Il s'agit d'en expliquer les propriétés essentielles du point de vue de la thermodynamique.

L'étude qui suit suppose acquises les notions de thermodynamique élémentaires (V. t. 1, Thermodynamique).

1.1. Cycle avec apport de chaleur à volume constant (cycle Beau de Rochas, fig. V-1). — Ce cycle est caractérisé par l'évolution d'une masse gazeuse m que l'on assimile en première approximation à un gaz parfait et dont

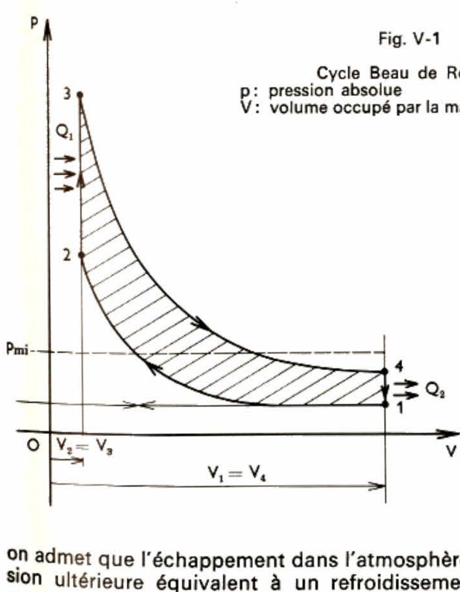


Fig. V-1

Cycle Beau de Rochas
p: pression absolue
V: volume occupé par la masse gazeuse m

on admet que l'échappement dans l'atmosphère et l'admission ultérieure équivalent à un refroidissement à volume constant. Cette évolution se fait de la façon suivante :

— de 1 en 2 : compression adiabatique ;
— de 2 en 3 : apport de chaleur à volume constant par la source chaude ;
— de 3 en 4 : détente adiabatique ;
— de 4 en 1 : transfert de chaleur à la source froide.

a) *Calcul du rendement thermodynamique théorique* η.

Par définition :

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

avec : $Q_1 = mC_v(T_3 - T_2)$

et : $Q_2 = mC_v\,(T_4 - T_1)$

Q_1 : chaleur apportée par la source chaude ;
Q_2 : chaleur cédée à la source froide ;
T_1, T_2, T_3, T_4 : températures absolues du gaz correspondant respectivement aux états 1, 2, 3 et 4 ;
C_v : chaleur massique à volume constant.

La relation d'état du gaz donne les équations suivantes en remarquant que $V_2 = V_3$ et $V_1 = V_4$.

$$(p_3 - p_2)V_2 = m\,R\,(T_3 - T_2)$$

et : $$(p_4 - p_1)V_1 = m\,R\,(T_4 - T_1)$$

d'où : $$\eta = 1 - \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{p_4 - p_1}{p_3 - p_2}$$

Or : $$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma}$$

et si nous posons par ailleurs :

$$\frac{V_1}{V_2} = \varepsilon$$

nous obtenons finalement :

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma - 1}}}$$

Le rendement thermodynamique du cycle de Beau de Rochas est donc fonction du rapport des chaleurs massiques γ du fluide évoluant et du rapport volumétrique de compression et de détente ε couramment et improprement appelé « taux de compression ».

b) *Calcul de la pression moyenne indiquée :* p_{mi}.

Le travail effectué par la masse gazeuse m au cours du cycle $\widehat{C}$ (1-2-3-4-1) est représenté par la surface hachurée dont l'aire est égale à : $\int_{\widehat{C}} pdV$. Ce travail est égal par ailleurs au produit de la différence de volume $V_1 - V_2$ et de la pression moyenne p_{mi} de sorte que :

$$p_{mi}\,(V_1 - V_2) = \int_{\widehat{C}} pdV$$

Sur les adiabatiques 1-2 et 3-4 nous avons évidemment :

$$pV^\gamma = \text{Cte}$$

Posons : $pV^\gamma = A$

soit : $p = \dfrac{A}{V^\gamma}$

D'où : $$\int pdV = -\frac{1}{\gamma - 1}\, pV + \text{Cte}$$

Nous en déduisons :

$$\int_1^2 pdV = -\frac{1}{\gamma-1}\,(p_2V_2 - p_1V_1)$$
$$= -\frac{1}{\gamma-1}\,p_2V_2\left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}\right]$$

$$\int_3^4 pdV = -\frac{1}{\gamma-1}\,(p_4V_4 - p_3V_3)$$
$$= \frac{1}{\gamma-1}\,p_3V_3\left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}\right]$$

Le travail de 2 en 3 et de 4 en 1 étant nul, nous obtenons, compte tenu de $p_2 = p_1\left(\dfrac{V_1}{V_2}\right)^\gamma$:

$$\int_{\widehat{C}} pdV = \frac{V_2}{\gamma-1}\,p_1\left(\frac{p_3}{p_2} - 1\right)\left[\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} - 1\right]$$

En posant comme précédemment $\dfrac{V_1}{V_2} = \varepsilon$, il vient :

$$\boxed{p_{mi} = \frac{1}{\gamma-1}\cdot\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}\cdot(\varepsilon^{\gamma-1} - 1)\,p_1\left(\frac{p_3}{p_2} - 1\right)}$$

La pression moyenne indiquée du cycle Beau de Rochas est donc fonction de quatre paramètres :

- Rapport des chaleurs massiques du fluide évoluant . . . . γ
- Rapport des volumes extrêmes d'évolution . . . . ε
- Pression absolue initiale . . . . p_1
- Rapport des pressions de fin de combustion et de fin de compression . . . . $\dfrac{p_3}{p_2}$

Toute augmentation de p_1, de ε, de $\dfrac{p_3}{p_2}$ entraîne une élévation de la pression moyenne indiquée. Cette remarque donne une première idée de l'intérêt que présente la suralimentation et l'accroissement du rapport volumétrique ε du point de vue de l'augmentation du rendement thermodynamique et de la pression moyenne.

1.2. Cycle avec apport de chaleur à pression constante (cycle de Diesel fig. V-2). Le cycle de Diesel se compose de deux adiabatiques, d'une isobare et d'une isochore.

— de 1 en 2, compression adiabatique ;
— de 2 en 3, apport de chaleur à pression constante ;

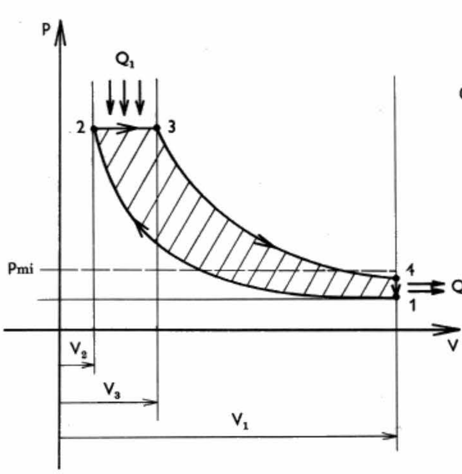


Fig. V-2
Cycle de Diesel

— de 3 en 4, détente adiabatique ;
— de 4 en 1, transfert de chaleur à la source froide.

a) *Calcul du rendement thermodynamique théorique* η.

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Or : $$Q_1 = mC_p\,(T_3 - T_2)$$

(si nous appelons C_p la chaleur massique à pression constante) ;

et : $$Q_2 = mC_v\,(T_4 - T_1)$$

d'où : $$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma}\cdot\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{\gamma}\cdot\frac{T_1}{T_2}\cdot\frac{\dfrac{T_4}{T_1} - 1}{\dfrac{T_3}{T_2} - 1}$$

Par ailleurs : $\dfrac{T_3}{T_2} = \dfrac{V_3}{V_2}$; $\dfrac{T_1}{T_2} = \left(\dfrac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$ et $\dfrac{T_4}{T_3} = \left(\dfrac{V_3}{V_1}\right)^{\gamma-1}$

or : $$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_4}{T_3}\cdot\frac{T_3}{T_2}\cdot\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^\gamma$$

Compte tenu des relations précédentes nous déduisons :

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma}\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}\cdot\frac{\left(\dfrac{V_3}{V_2}\right)^\gamma - 1}{\dfrac{V_3}{V_2} - 1}$$

En posant : $\dfrac{V_1}{V_2} = \varepsilon$

et : $\dfrac{V_1}{V_3} = \varepsilon'$

nous obtenons finalement :

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{1}{\gamma}\cdot\frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}\cdot\frac{\left[\left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon'}\right)^\gamma - 1\right]}{\left[\left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon'}\right) - 1\right]}}$$

Remarquons que le rendement η du cycle Diesel est toujours inférieur au rendement du cycle Beau de Rochas, à même rapport volumétrique de compression.

Nous retrouvons le rendement du cycle à volume constant lorsque ε' tend vers ε. En effet, si nous posons :

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon'} = 1 + \nu \text{ avec } \nu \longrightarrow 0 \text{ quand } \frac{\varepsilon}{\varepsilon'} \longrightarrow 1$$

à la limite : $$\frac{\left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon'}\right)^\gamma - 1}{\left(\dfrac{\varepsilon}{\varepsilon'}\right) - 1} = \gamma$$

et : $$\eta = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$

b) *Calcul de la pression moyenne indiquée* p_{mi}. — Nous avons défini la pression moyenne indiquée par la relation :

$$p_{mi} = \frac{1}{V_1 - V_2}\int_{\widehat{C}} pdV$$

Compte tenu de la définition du rendement thermodynamique nous pouvons écrire :

$$\eta = \frac{\int_{\widehat{C}} pdV}{JQ_1}$$

d'où : $$p_{mi} = \frac{1}{V_1 - V_2}\,JQ_1\eta$$

Le calcul de p_{mi} se ramène donc à celui de Q_1 compte tenu du calcul préalable de η :

$$Q_1 = mC_p\,(T_3 - T_2) = mC_p\,T_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)$$

Or : $$T_2 = \frac{p_1V_1}{mR}\left(\frac{V_1}{V_2} - 1\right)$$

et : $$\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2}$$

d'où : $$Q_1 = \frac{C_p}{R} p_1 V_1 \left(\frac{V_3}{V_2} - 1\right) \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma - 1}$$

La relation de Mayer entraîne :

$$\frac{C_p}{R} = \frac{1}{J} \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1}$$

d'où : $$Q_1 = \frac{1}{J} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(\frac{V_3}{V_2} - 1\right) \varepsilon^{\gamma - 1} p_1 V_1$$

et : $$p_{mi} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} p_1 \eta \left(\frac{V_3}{V_2} - 1\right) \varepsilon^{\gamma - 1}$$

En remplaçant η par sa valeur, nous obtenons finalement :

$$p_{mi} = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} p_1 \left\{ \gamma \left[\left(\frac{V_3}{V_2}\right) - 1 \right] \varepsilon^{\gamma - 1} - \left[\left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\gamma} - 1 \right] \right\}$$

Dans le cycle Diesel l'évolution de la pression moyenne indiquée p_{mi} dépend également de quatre paramètres. Il est intéressant de noter que contrairement au cycle à volume constant, l'augmentation de la p_{mi} due à l'apport de chaleur $\left(\text{accroissement du rapport } \frac{V_3}{V_2}\right)$ se traduit par une chute du rendement thermodynamique.

Exemple d'application. — Effectuons, comme exemple d'application, la comparaison des rendements et pressions moyennes indiquées des cycles à volume constant et à pression constante pour un même apport de chaleur et un même rapport volumétrique de compression.

Cela entraîne :

$$\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)_{p = \text{Cte}} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)_{v = \text{Cte}}$$

et : $$\left(\frac{V_3}{V_2}\right)_{p = \text{Cte}} = 1 + \frac{1}{\gamma} \left(\frac{p_3}{p_2} - 1\right)_{v = \text{Cte}}$$

Prenons les valeurs suivantes :

$$\varepsilon = 10, \ \gamma = 1{,}4, \ p_1 = 1 \text{ bar}, \ \frac{p_3}{p_2} = 1$$

nous obtenons :

Cycle	Volume constant	Pression constante
η	0,60	0,51
p_{mi}	8,4 bars	7,15 bars

Du point de vue thermodynamique cet exemple montre clairement la supériorité du cycle à combustion à volume constant.

2. CYCLES RÉELS — RENDEMENTS (fig. V-3)

Les cycles réels s'éloignent assez sensiblement des cycles théoriques pour les causes principales suivantes :

— L'apport de chaleur n'est jamais complètement isochore ou isobare en raison de la loi d'évolution progressive de la combustion, du mouvement du piston et des échanges de chaleur avec les parois durant la combustion.

— L'évacuation isochore des gaz brûlés (correspondant pour le cycle théorique au transfert de chaleur à la source froide) n'est pas réalisable en pratique.

— Les phases d'admission et d'échappement ne suivent pas une évolution isobare, suite aux pertes de charge et aux phénomènes de propagation d'ondes dans les conduites.

— La compression et la détente ne suivent qu'approximativement une évolution isentropique.

— Le fluide évoluant n'est pas rigoureusement assimilable à un gaz parfait.

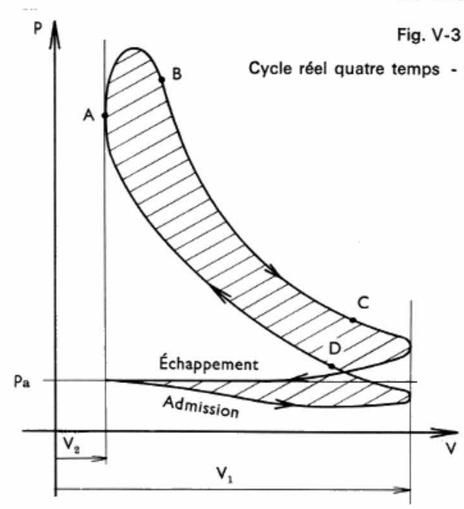


Fig. V-3

Cycle réel quatre temps - pleine admission

A. Début de combustion. — B. Fin de combustion. — C. Début de l'échappement. — D. Fin de l'admission

C'est pourquoi les valeurs mesurées du rendement et de la pression moyenne diffèrent notablement des valeurs théoriques calculées. Par ailleurs, l'interprétation des diagrammes réels nécessite l'utilisation d'un certain nombre de rendements supplémentaires.

2.1. Rendement indiqué η_i. — L'apport de chaleur Q_1 résulte de la combustion plus ou moins complète de la masse m d'un mélange d'air et d'hydrocarbure. Si Q est la quantité de chaleur libérée par la combustion à volume constant (dans une bombe calorimétrique) de l'unité de masse de ce même mélange, le rendement indiqué η_i est égal au rapport du travail correspondant à la surface du diagramme réel $\int_{\widehat{C}} pdV$ et de l'équivalent mécanique de la quantité de chaleur JmQ dégagée par la combustion :

$$\eta_i = \frac{\int_{\widehat{C}} pdV}{JmQ}$$

2.2. Rendement mécanique η_m. — Le rendement mécanique est égal au rapport du travail effectif mesuré en bout d'arbre et du travail correspondant à la surface du diagramme réel.

2.3. Rendement thermique global η_g. — Par définition le rendement thermique global est égal au produit du rendement indiqué et du rendement mécanique :

$$\eta_g = \eta_i \, \eta_m$$

Il se calcule en formant le rapport existant entre le travail effectif mesuré en bout d'arbre et l'équivalent mécanique de la quantité de chaleur dégagée par la combustion du mélange à la bombe calorimétrique. Nous montrerons par la suite que le rendement global est égal, à une constante près, à l'inverse de la consommation spécifique de combustible.

2.4. Rendement de combustion et rendement de forme. — La différence entre le rendement indiqué et le rendement thermodynamique théorique permet d'apprécier globalement la perte qui résulte :
— du transfert de chaleur aux parois ;
— de la combustion incomplète ;
— de la forme imparfaite du diagramme.

C'est dans le but de pouvoir étudier séparément l'influence de ces différentes causes que le professeur Serruys a été amené à définir un rendement de combustion et un rendement de forme.

Le rendement de combustion η_c est égal au rapport de la quantité de chaleur utilement dégagée par la combustion et de la quantité de chaleur dégagée par la combustion à la bombe calorimétrique.

Le rendement de forme η_f est égal au rapport du rendement thermodynamique du cycle théorique et du rendement thermodynamique du cycle réel.

Compte tenu de ces définitions nous obtenons finalement les deux relations suivantes :

$$\eta_i = \eta\, \eta_f\, \eta_c$$
$$\eta_g = \eta_i\, \eta_m$$

Ainsi la pression moyenne indiquée p_{mi} du cycle théorique calculée précédemment devient en bout d'arbre, compte tenu des rendements de transformations, la pression moyenne p_{me} :

$$p_{me} = \eta\, \eta_f\, \eta_c\, \eta_m\, p_{mi}$$

3. NOTIONS DE PUISSANCE ET DE COUPLE

Le calcul de la puissance et du couple nécessite au préalable un rappel de quelques définitions propres au moteur (fig. V-4).

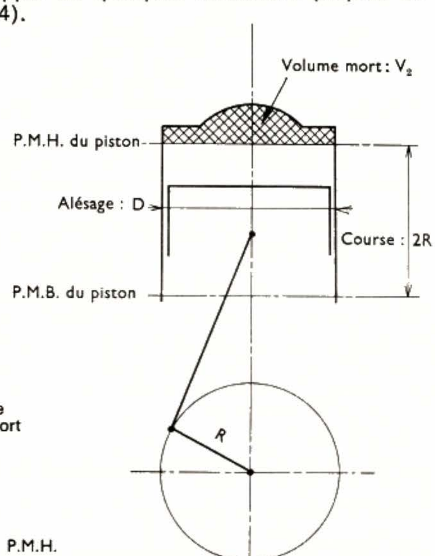


Fig. V-4

Définition de la cylindrée et du volume mort

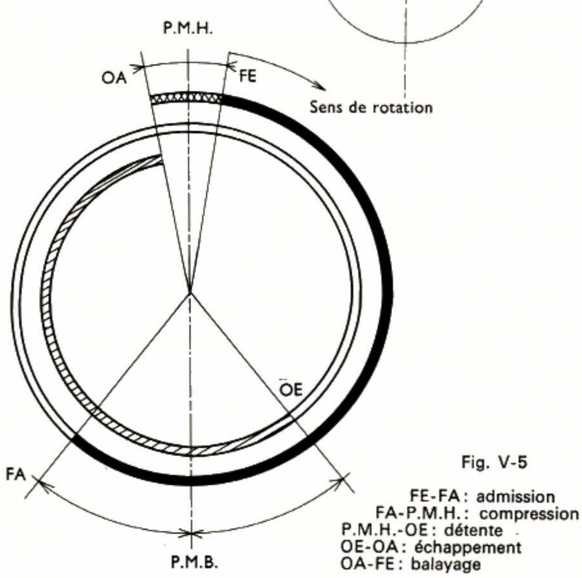


Fig. V-5

Course. — La course est égale au déplacement du piston entre le point mort haut (P.M.H.) et le point mort bas (P.M.B.). Elle a pour valeur $2R$.

Alésage. — L'alésage est caractérisé par le diamètre intérieur D du cylindre.

Cylindrée unitaire. — C'est le volume balayé par le piston entre le P.M.H. et le P.M.B. Autrement dit si V_0 est le volume de la cylindrée : $V_0 = \frac{\pi D^2 R}{2} = 2RS$

(S : section du cylindre).

Cylindrée totale. — C'est le produit de la cylindrée unitaire V_0 par le nombre de cylindres n.

Volume mort. — C'est le volume occupé par les gaz lorsque le piston est au P.M.H. En se reportant au diagramme de la figure V-3 on voit que le volume mort est égal à V_2.

Compte tenu de l'égalité $V_0 = V_1 - V_2$ nous pouvons écrire :

$$V_2 = \frac{V_0}{\varepsilon - 1}$$

Vitesse de rotation. — Il s'agit de la vitesse de rotation ω ou vitesse angulaire du vilebrequin. Elle est donnée par l'expression :

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{\pi N}{30} \quad \text{(radians par seconde)}$$

si N désigne la fréquence de rotation du vilebrequin exprimée en tours par minute.

Vitesse moyenne de piston. — Le piston parcourant deux fois la course par tour, la vitesse moyenne est évidemment égale à : $U = \frac{2\,RN}{30}$

Puissance. — La puissance W en bout d'arbre est égale au travail effectif par unité de temps. Le travail par cycle et par cylindre étant égal à $p_{me} \cdot V_0$, nous obtenons par conséquent les relations suivantes :

$$W = \frac{p_{me}\, n\, V_0\, N}{120}$$

pour un moteur à quatre temps à n cylindres ;

et :
$$W = \frac{p_{me}\, n\, V_0\, N}{60}$$

pour un moteur à deux temps à n cylindres.

Couple. — Si T est le moment du couple effectif en bout d'arbre, nous tirons de la relation bien connue $W = T\omega$

$$T = \frac{W \times 60}{2\,\pi N}$$

Consommation spécifique. — C'est le rapport Cs entre la consommation horaire de combustible q_c et la puissance W :

$$Cs = \frac{q_c}{W}$$

Des formules de la puissance et du couple nous déduisons deux relations intéressantes :

$$p_{me}\, V_0 = \frac{4\,\pi T}{n}$$

pour un moteur à quatre temps à n cylindres,

et :
$$p_{me}\, V_0 = \frac{2\,\pi T}{n}$$

pour un moteur à deux temps à n cylindres.

Remarque : Si, selon l'usage, on cherche à exprimer la puissance W en chevaux (1 ch = 736 W) et le couple T en mètres décanewtons à partir de la pression moyenne efficace p_{me} exprimée en bars et de la cylindrée exprimée en litres, pour un moteur à quatre temps on obtient :

$$W_{ch} = \frac{1}{900}\, p_{me}\, n\, V_0\, N \quad \text{et} \quad T = 716\, \frac{W_{ch}}{N}$$

La consommation spécifique est généralement exprimée en grammes par cheval-heure (1 g/ch-h = $1{,}3 . 10^{-3}$ g/Wh). Le combustible ayant un pouvoir calorifique de 10 200 kcal/kg, le rendement global η_g d'un moteur dont la consommation spécifique est Cs (en grammes par cheval-heure) est égale à :

$$\eta_g \approx \frac{63{,}2}{Cs}$$

4. ÉTUDE DU TRANSVASEMENT

Bien que le cycle soit traditionnellement divisé en quatre temps, en pratique il convient de distinguer les six phases distinctes suivantes : admission, compression, combustion, détente, échappement et balayage.

Les limites angulaires de ces différentes phases sont repérées sur le diagramme de la figure V-5 à l'exception

de la combustion qui empiète généralement sur la fin de la compression et le début de la détente.

Les phases d'admission, d'échappement et de balayage constituent le transvasement et correspondent à l'évolution d'une masse de gaz variable dans le cylindre.

4.1. Théorie simplifiée de la loi d'évolution de pression dans le cylindre. Admission et échappement. — L'étude suivante repose sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices :

— absence de tubulure à l'admission et à l'échappement ;
— application possible sans erreur excessive des formules du régime permanent ;
— influence des échanges de chaleur avec les parois négligeables ;
— gaz évoluants supposés parfaits.

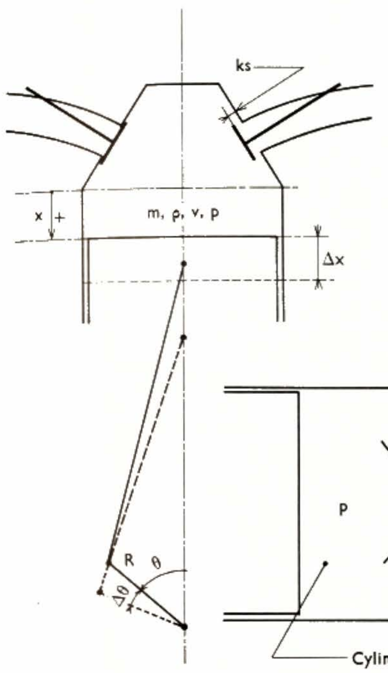


Fig. V-6

Évolution des gaz dans le cylindre

Nous appelons (fig. V-6) :
m : la masse de gaz contenue dans le cylindre à l'instant t ;
ρ : la masse volumique de ce gaz ;
V : le volume qu'il occupe ;
p : sa pression.

Nous pouvons écrire : $m = \rho V$

et en prenant les différentielles logarithmiques sous forme finie :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta m}{\rho V} - \frac{\Delta V}{V} \tag{1}$$

En supposant adiabatique l'évolution des gaz dans le cylindre, il vient :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{\gamma}\frac{\Delta p}{p} \tag{2}$$

Par ailleurs :

$$V = \frac{V_0 x}{2R} + \frac{V_0}{\varepsilon - 1} = \frac{V_0}{2}\left(\frac{x}{R} + \frac{2}{\varepsilon - 1}\right) = RS\left(\frac{x}{R} + \frac{2}{\varepsilon - 1}\right)$$

et : $\Delta V = S\Delta x$ (S : surface de l'alésage)

d'où :

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta x}{R}\,\frac{1}{\dfrac{2}{\varepsilon - 1} + \dfrac{x}{R}} \tag{3}$$

Si u_s et ρ_s sont respectivement la vitesse et la masse volumique des gaz dans la section débitante de surface s et de coefficient de débit k, et si Δm est la masse débitée pendant le temps Δt nous pouvons écrire :

$$\Delta m = \lambda \rho_s u_s ks\, \Delta t$$

avec : $\lambda = 1$ pour un flux entrant dans le cylindre ;
$\lambda = -1$ pour un flux sortant du cylindre.

Or, à l'instant t, la vitesse angulaire du vilebrequin et la vitesse moyenne du piston sont respectivement égales à :

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\pi N}{30} \text{ et } U = \frac{2RN}{30}$$

d'où :

$$\Delta t = \frac{2}{\pi}\frac{R}{U}\Delta\theta$$

et :

$$\frac{\Delta m}{\rho V} = \frac{2\lambda}{\pi}\cdot\frac{\rho_s u_s ks}{\rho US}\cdot\frac{\Delta\theta}{\dfrac{x}{R} + \dfrac{2}{\varepsilon - 1}} \tag{4}$$

En reportant (2), (3) et (4) dans (1) et en exprimant θ en degrés nous obtenons :

$$\frac{\Delta p}{p} = \gamma\,\frac{\Delta\theta}{\dfrac{x}{R} + \dfrac{2}{\varepsilon - 1}}\left[\frac{\lambda}{90}\cdot\frac{\rho_s u_s ks}{\rho US} - \frac{1}{R}\frac{\Delta x}{\Delta\theta}\right] \tag{5}$$

Calcul des conditions à la section contractée. — Nous envisagerons trois cas possibles :

— *Flux sortant du cylindre* avec rapport de pression amont-aval supérieur au rapport critique et écoulement sonique.
— *Flux sortant du cylindre* avec écoulement subsonique.
— *Flux entrant dans le cylindre* avec écoulement subsonique.

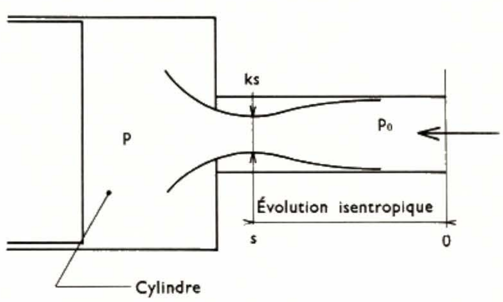


Fig. V-7

Conditions limites à la soupape pour les gaz sortant du cylindre

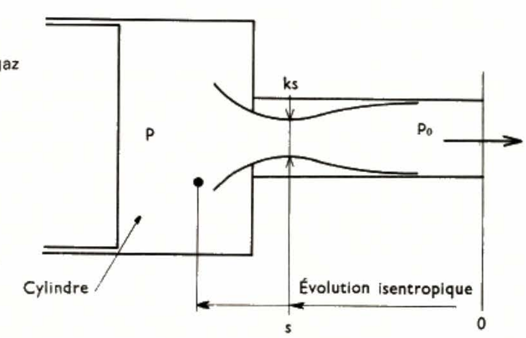


Fig. V-8

Conditions limites à la soupape pour les gaz entrant dans le cylindre

Premier cas (fig. V-7) :

$$\frac{p}{p_0} \geqslant \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}$$

La vitesse d'écoulement u_s est égale à la vitesse du son à la section contractée soit :

$$u_s = c\left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{1}{2}}$$

et :

$$\rho_s = \rho\left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}$$

d'où :

$$\rho_s u_s = \rho c\left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \tag{6}$$

Deuxième cas (fig. V-7) :

La vitesse u_s est donnée par la relation suivante (formule de Saint-Venant).

$$u_s = c\left\{\frac{2}{\gamma - 1}\left[1 - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right]\right\}^{\frac{1}{2}}$$

et :

$$\rho_s = \rho\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

d'où :

$$\rho_s u_s = \rho c\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}}\left\{\frac{2}{\gamma - 1}\left[1 - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right]\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

Troisième cas (fig. V-8) :

Appelons c_0 la vitesse du son à la température d'admission

$$u_s = c_0\left\{\frac{2}{\gamma - 1}\left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right]\right\}^{\frac{1}{2}}$$

et:
$$\rho_s = \rho_0 \left(\frac{p_0}{p_c}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

d'où :
$$\rho_s u_s = \rho_0 c_0 \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{\frac{2}{\gamma - 1}\left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]\right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (8)$$

Les expressions (5), (6), (7) et (8) permettent de calculer par une méthode d'intégration pas à pas, et compte tenu des conditions initiales dans le cylindre, l'évolution de la pression p dans le cylindre en fonction de la rotation du vilebrequin. Dans les cas ordinaires, on utilise ces expressions dans les conditions suivantes :

Admission :

$\frac{p}{p_0} < 1$, $\lambda = 1$, équations (5) et (8) ;

$\frac{p_0}{p} > 1$, $\lambda = -1$, équations (5) et (7) (recrachements éventuels de gaz en fin d'admission).

Échappement :

$\frac{p}{p_0} \geqslant \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$, $\lambda = -1$, équations (5) et (6) ; (début de la phase d'échappement) ;

$\frac{p}{p_0} > 1$, $\lambda = -1$, équations (5) et (7).

4.2. Admission (cas du monocylindre). — La phase d'admission conditionne la masse gazeuse admise à chaque cycle dans le cylindre et par conséquent la pression moyenne indiquée. Le problème qui se pose à pleine ouverture de l'admission étant généralement d'obtenir la puissance la plus grande possible, il est nécessaire de chercher à utiliser au maximum le volume de la cylindrée, ce qui conduit à définir le taux de remplissage du cylindre.

On appelle taux de remplissage le rapport du volume de gaz réellement admis à chaque cycle et du volume de la cylindrée.

Appelons :

m : la masse réellement admise par cycle ;
ρ_a : la masse volumique du gaz à l'amont de l'admission ;
V_0 : le volume de la cylindrée ;
τ : le taux de remplissage ;

Par définition : $$\tau = \frac{m}{\rho_a V_0}$$

Si la détermination du taux de remplissage est facilement accessible à l'expérience, il n'en est pas de même en ce qui concerne son calcul théorique, en raison du nombre de paramètres et des lois qui régissent le phénomène d'admission. L'étude de l'admission dans le cas le plus général conduit en effet à l'intégration d'équations différentielles dont l'emploi sortirait du cadre de cet article. Nous nous limiterons donc à des considérations plus élémentaires et en conséquence de portée plus limitée.

Sur le plan physique, le phénomène d'admission est le résultat des mouvements conjugués du piston et de la soupape d'admission ; cela entraîne un transfert de gaz de l'atmosphère au cylindre par l'intermédiaire d'un conduit de forme plus ou moins compliquée.

En raison du mouvement périodique du piston et de la soupape, l'écoulement des gaz est astationnaire et la conduite d'admission est le siège d'ondes de pressions progressives et stationnaires. Dans ce qui suit, nous nous proposons donc de définir, du point de vue pratique, l'influence des paramètres géométriques, aérodynamiques et acoustiques de l'admission sur le remplissage du moteur en appliquant une étude basée sur l'utilisation de critères déterminés par des méthodes plus ou moins empiriques. Ces critères sont au nombre de trois.

a) *Index de Mach* (fig. V-9). — L'index de Mach M caractérise l'efficacité de l'orifice d'admission. Il est égal à la vitesse moyenne d'écoulement, mesurée à la soupape, rapportée à la vitesse de propagation du son c_0 dans les conditions de température d'admission.

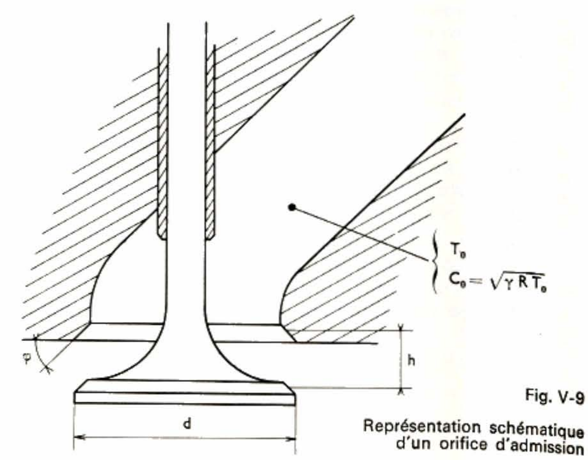


Fig. V-9
Représentation schématique d'un orifice d'admission

Appelons :

u : la vitesse d'écoulement ;

$\overline{C_v}$: le coefficient moyen de débit rapporté à la surface s de la soupape.

$$u = U \frac{S}{s \cdot \overline{C_v}}$$

d'où : $$M = \left(\frac{D}{d}\right)^2 \frac{U}{\overline{C_v} \cdot c_0}$$

Il est prouvé que le taux de remplissage diminue rapidement pour des valeurs de M supérieures à 0,5.

Le coefficient $\overline{C_v}$ est déterminé expérimentalement en soufflerie (fig. V-10).

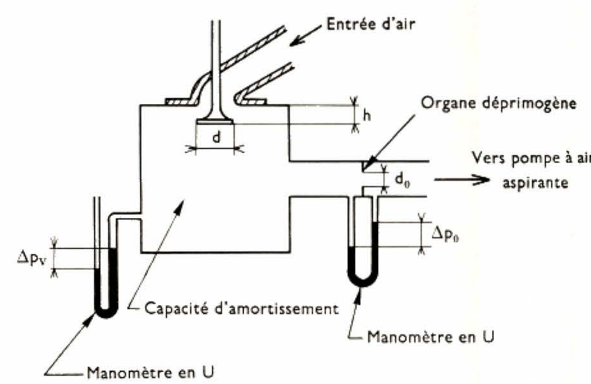


Fig. V-10 — Schéma d'une installation d'essai pour mesurer le coefficient de débit d'un orifice d'admission

Si α est le coefficient de débit de l'organe déprimogène généralement défini par les normes (normes AFNOR, DIN, etc.), on mesure C_v en fonction de la levée h de la soupape (courbe *a* de la figure V-11).

$$C_v = \alpha \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\Delta p_v}} = f(h)$$

On détermine ensuite la relation $C_v = f(\theta)$ (courbe *b*, fig. V-11) compte tenu de la loi de levée de soupape choisie (V. chap. 6 § 4.1), puis on calcule $\overline{C_v}$ par intégration :

$$\overline{C_v} = \frac{1}{\theta_{FA} - \theta_{OA}} \sum_{OA}^{FA} C_v \, \Delta\theta$$

Toute modification dans le dessin du conduit d'admission ou de la soupape tendant à augmenter la valeur de C_v conduit généralement à l'amélioration du taux de remplissage vers les grandes vitesses de pistons (ou grandes vitesses de rotation du moteur).

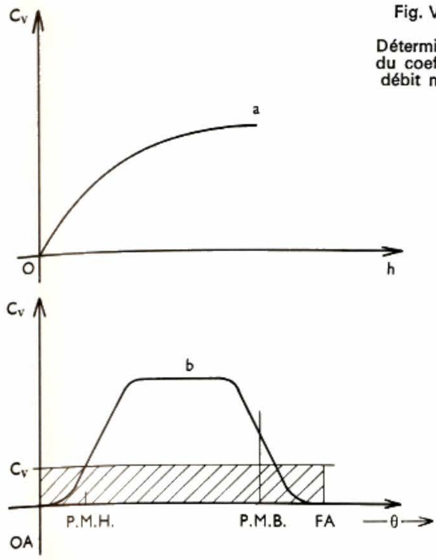


Fig. V-11

Détermination du coefficient débit moyen

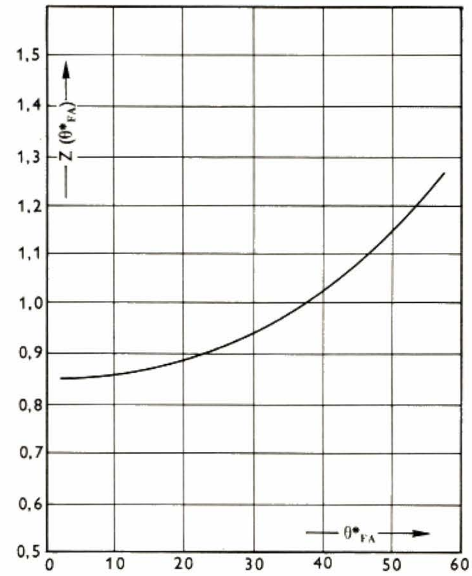


Fig. V-13

Relation entre l'index de suralimentation et le diagramme de distribution (d'après *Shizno Yagi*)

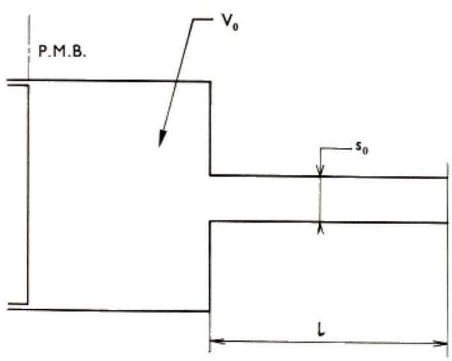
b) *Effets d'inertie.* — La colonne de gaz contenue dans la veine d'admission est soumise à une accélération en début de course du piston et à un ralentissement en fin de course. La force d'inertie due au ralentissement entraîne une élévation de pression (et donc de masse volumique) des gaz admis à *FA*. En utilisant les effets d'inertie dans le conduit d'admission il est possible d'obtenir un taux de remplissage supérieur à 100 %. Le professeur T. Asanuma utilise trois paramètres pour caractériser ces effets :

— L'index de suralimentation par inertie *Z*.

— Le coefficient de restriction de débit dans les conduits d'admission μ.

— L'angle de fermeture de la soupape d'admission θ_{FA}.

Fig. V-12



Définition d'un système acoustique équivalent au cylindre muni d'une conduite d'admission

Appelons (fig. V-12) :

l: la longueur réelle du conduit d'admission ;

s_0: la section transversale du conduit d'admission.

L'index de suralimentation est fonction du coefficient μ et de θ_{FA} :

$$Z = \frac{\pi}{30} \frac{N}{c_0} \sqrt{\frac{V_0 l}{s_0}}$$

Pour l'application pratique au moteur, la section moyenne effective à la soupape $\overline{C}_v s$ et la longueur effective du conduit l_s déduite de la variation éventuelle de section le long du conduit d'admission, sont substituées dans l'équation précédente à s_0 et l.

Il vient :

$$Z(\theta^{\star}_{FA}) = \frac{\pi}{30} \frac{N}{c_0} \sqrt{\frac{V_0\ l_s}{\overline{C}_v\ s}}$$

$\theta^{\star}_{FA}$ est l'angle de rotation du vilebrequin après le P.M.B., pour lequel la section réelle de passage à la soupape est égale à 0,5 cm².

La section réelle σ de passage à la soupape est donnée par l'équation suivante :

$\sigma = C_v\, \pi\, d\, h \cos \varphi$ (φ : angle du siège de soupape).

La courbe de la figure V-13 extraite du S.A.E. (*Society of Automotive Engineers*) Preprint 700.122 donne la relation expérimentale $Z\,(\theta^{\star}_{FA}) = f(\theta^{\star}_{FA})$. Il est donc facile, compte tenu de la relation ci-dessus, de prédéterminer par le calcul le régime de rotation pour lequel l'effet d'inertie est maximal.

c) *Effets pulsatoires.* — La conduite d'admission constitue sur le plan acoustique un oscillateur à air et à ondes stationnaires périodiquement excité par le mouvement du piston et de la soupape (fig. V-14). On sait qu'un oscillateur a la propriété de vibrer naturellement sur sa fréquence propre fondamentale et ses harmoniques. La fréquence propre fondamentale de la conduite d'admission,

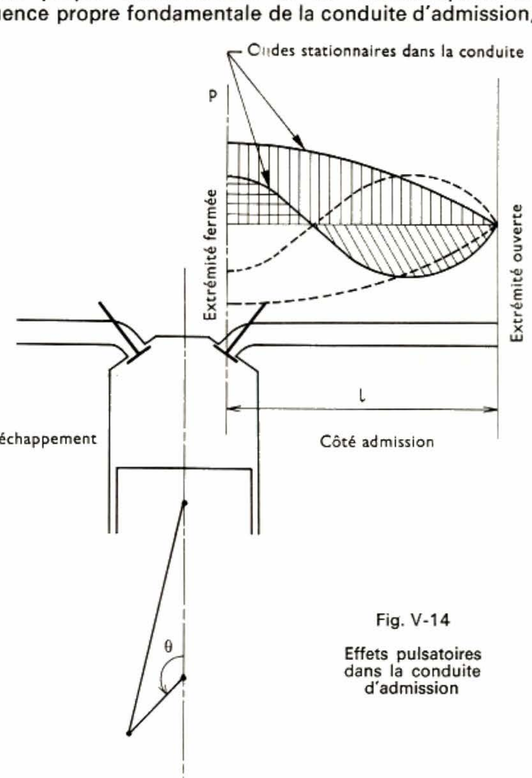


Fig. V-14

Effets pulsatoires dans la conduite d'admission

qui ne dépend en l'occurrence que de sa longueur (section supposée constante), des conditions aux limites et de la température des gaz qu'elle contient, est déterminante, en phase et en amplitude, des conditions qui s'établiront à la soupape d'un cycle sur l'autre. C'est pourquoi la courbe caractéristique de remplissage est largement influencée par les effets pulsatoires.

Dans le cas représenté sur la figure V-14, la conduite d'admission est fermée à une extrémité par la soupape et ouverte à l'autre extrémité à l'atmosphère. La vibration étant en quart d'onde, la fréquence propre fondamentale a pour valeur : $f = \frac{c_0}{4l}$ et la période : $T = \frac{4l}{c_0}$.

Appelons :

θ^* : l'angle de rotation du vilebrequin entre *FA* et le P.M.H. croisement ;

q : l'ordre de l'onde qui coïncide avec le P.M.H. croisement.

Le temps nécessaire pour effectuer la rotation θ^* au régime de rotation N a pour valeur :

$$t = \frac{\theta^*}{360} \times \frac{60}{N}$$

d'où :

$$q = \frac{t}{T} = \frac{\theta^* \, c_0}{24 \, N \, l}$$

La condition de synchronisation des ondes est donc donnée par la relation :

$$\frac{\theta^*}{6N} = q \, \frac{4l}{c_0}$$

L'expérience montre que les maximums de remplissage sont obtenus pour $q = 2, 3, 4$, etc. et les creux pour $q = 2{,}5, 3{,}5, 4{,}5$, etc. Cela permet de connaître les régimes favorables et ceux qui sont défavorables.

En réalité, en raison de l'amortissement dû au coefficient de réflexion à l'entrée de la conduite d'admission et des frottements internes, de l'influence de la propagation du son et de la forme généralement évolutive de la conduite, il s'avère nécessaire d'apporter un coefficient de correction fonction de q. À titre d'exemple des effets pulsatoires dans la conduite d'admission, la figure V-15 a représente la photographie d'un enregistrement de la pression instantanée mesurée sur un moteur monocylindre.

4.3. Échappement (cas du monocylindre). — La phase d'échappement débute à l'ouverture de l'orifice d'échappement et se termine avec l'ouverture de l'orifice d'admission. On la divise ordinairement en deux temps : la bouffée et le refoulement.

La bouffée correspond à l'évacuation des gaz brûlés par détente naturelle à travers l'orifice d'échappement jusqu'à ce que la pression dans le cylindre devienne égale à la pression du collecteur. L'angle de rotation nécessaire au passage de la bouffée correspond à un déplacement du piston de part et d'autre du P.M.B.

Le refoulement des gaz brûlés par le piston se fait selon un processus analogue à celui de l'admission, c'est en quelque sorte l'opération symétrique de l'admission.

On observe au cours du passage de la bouffée deux évolutions distinctes de l'écoulement. L'une correspond à un rapport des pressions cylindre et conduite d'échappement supérieur au rapport de pression critique ; l'écoulement ne dépend alors que des conditions régnant dans le cylindre. L'autre fait suite à la première sans discontinuité ; l'écoulement dépend alors des conditions régnant à l'amont et à l'aval de la soupape d'échappement. Il est donc évident que la deuxième partie de la bouffée et le refoulement sont largement influencés par la présence de la conduite d'échappement.

L'utilisation de critères basés sur l'étude acoustique est plus hasardeuse qu'à l'admission en raison de l'amplitude des ondes de pression et il faut bien convenir que les résultats expérimentaux s'éloignent assez largement des résultats que prévoit le calcul de ces critères, principalement dans le cas du monocylindre. C'est pourquoi il ne nous semble pas intéressant d'insister sur ce point. À titre d'exemple la figure V-15 b représente l'enregistrement de la pression instantanée mesurée dans la conduite d'échappement d'un monocylindre à proximité de la soupape d'échappement.

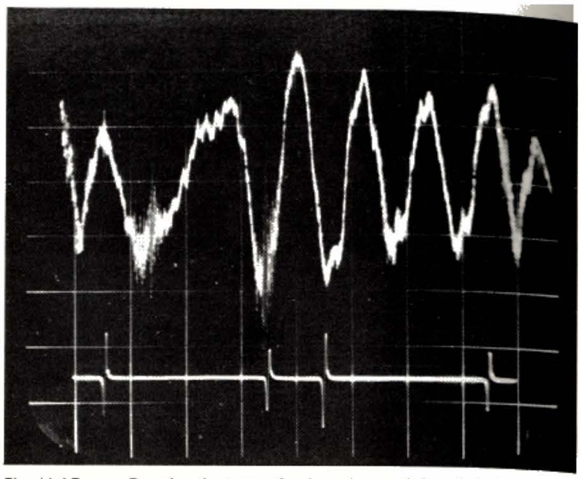


Fig. V-15 a — Pression instantanée dans la conduite d'admission d'un moteur monocylindre durant un cycle

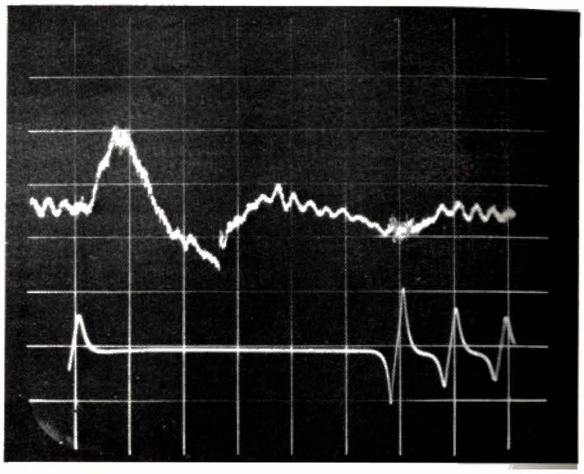


Fig. V-15 b — Pression instantanée dans la conduite d'échappement d'un moteur monocylindre durant un cycle

À noter la présence d'une onde de pression à front raide, ce qui justifie les remarques précédentes.

4.4. Balayage. — L'effet de balayage au voisinage du P.M.H. du piston, ne peut être obtenu, sur un moteur atmosphérique que par l'action simultanée du croisement de soupape et des effets pulsatoires dans les conduites d'admission et d'échappement. Il faut considérer différentes possibilités en fonction des niveaux de pression p_a à l'admission, p dans le cylindre et p_e à l'échappement.

a) $p_a > p > p_e$: l'écoulement se fait dans le sens admission-échappement et les gaz brûlés restant dans le cylindre sont balayés par les gaz frais de l'admission. Notons qu'un balayage efficace permet d'augmenter le taux de remplissage dans le rapport : $\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}$.

b) $p_a < p < p_e$: l'écoulement se fait dans le sens échappement-admission. Il y a contrebalayage. Il s'agit d'un cas très défavorable en raison du défaut de vidange de l'espace mort et de la réaspiration de gaz brûlés en début d'admission.

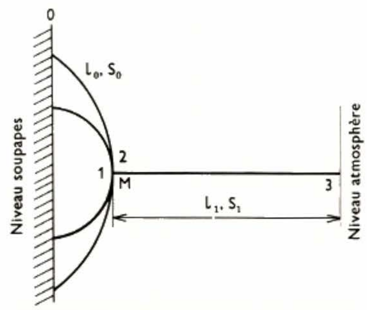
c) $p_a < p$ et $p > p_e$: condition d'un contrebalayage partiel. Ce cas est presque aussi défavorable que le précédent.

d) $p_a > p$ et $p < p_e$: défaut de balayage de l'espace mort.

L'effet de balayage des gaz brûlés est recherché sur les moteurs de performances élevées. C'est une des raisons pour lesquelles on utilise des croisements de soupape importants, associés à des conduites d'admission et d'échappement accordées, sur les moteurs des voitures de compétition.

4.5. Admission et échappement du moteur polycylindre. — Il est possible de calculer les fréquences propres d'un collecteur d'admission (ou d'échappement) en assimilant les conduits le composant à des dispositifs acoustiques, appelés tuyaux sonores. Cette étude sort du cadre de cet article. Nous nous contenterons de signaler que dans le cas d'un collecteur d'échappement « quatre dans un » (fig. V-16), c'est-à-dire comportant quatre conduites séparées aboutissant en un point d'un conduit

Fig. V-16

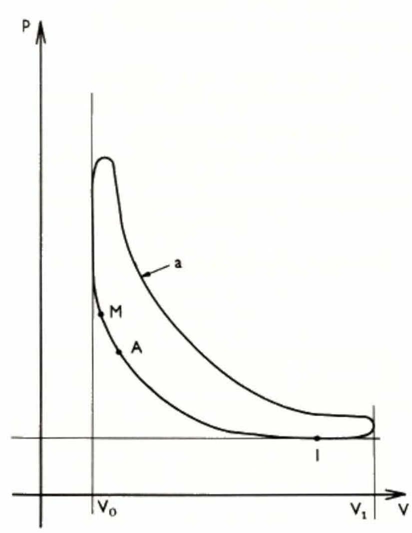


de section constante débouchant dans l'atmosphère, la fréquence fondamentale d'excitation f_0 est égale à $\frac{N}{30}$ (N: fréquence de rotation du moteur exprimée en tours par minute). Par ailleurs, en essai, on a vérifié que la condition de résonance sur la fréquence fondamentale (fréquence d'excitation = fréquence propre) est favorable à l'admission et défavorable à l'échappement du point de vue remplissage. Il est possible de prédéterminer par le calcul les vitesses de rotation du moteur pour lesquelles se produiront des bosses ou des creux de remplissage. Il est même pratiquement possible, en réalisant une impédance acoustique variable à l'extrémité du conduit unique, de maintenir les conditions favorables au remplissage sur une grande plage de variation de régime du moteur (l'impédance acoustique en un point est numériquement égale au rapport de la pression et du débit des gaz en ce point).

4.6. Étude des phases compression-combustion-détente. — La figure V-17 représente deux diagrammes de pression dans le cylindre. L'un est tracé en fonction de la variation de volume V, l'autre en fonction de l'angle de rotation θ du vilebrequin. La courbe b du second diagramme est relative à l'évolution de pression au cours d'un cycle sans allumage.

Fig. V-17 a

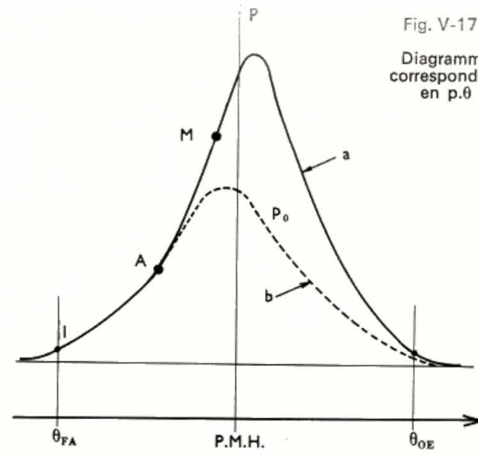
Diagramme pression-volume



Le point I que nous prendrons comme origine correspond à la fermeture de la soupape d'admission, le point A représente l'origine de la combustion; le point M est un point quelconque du diagramme.

Fig. V-17 b

Diagramme correspondant en p.θ



Nous allons déterminer la pression p au point M en fonction de θ.

Si $\mathcal{U}$ est l'énergie interne des gaz à l'intérieur du cylindre et si Q_{IM} est l'apport de chaleur entre le point initial I et le point final M l'application du principe de la conservation de l'énergie donne:

$$-\int_{V_I}^{V_M} p dV + JQ_{IM} = \mathcal{U}_M - \mathcal{U}_I$$

Si γ_m est la valeur moyenne du rapport des chaleurs massiques à pression et à volume constant, il vient:

$$\mathcal{U}_M - \mathcal{U}_I = \frac{1}{(\gamma_m - 1)} (p_M V_M - p_I V_I)$$

d'où:

$$p_M = \frac{1}{V_M}\left[p_I V_I + J(\gamma_m - 1) Q_{IM} - (\gamma_m - 1)\int_{V_I}^{V_M} p dV\right]$$

En différentiant par rapport à θ, nous obtenons l'expression de la variation de pression au point M:

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{1}{V_M}\left[J(\gamma_m - 1)\frac{dQ_{IM}}{d\theta} - (\gamma_m - 1) p \frac{dV}{d\theta}\right] \quad (1)$$

L'apport de chaleur Q_{IM} résulte de la chaleur dégagée par la combustion et du transfert de chaleur par les parois en sorte que si Q_c représente la chaleur de combustion et Q_p le transfert par les parois, nous pouvons écrire:

$$Q_{IM} = Q_c + Q_p \quad \text{et:} \quad \frac{dQ_{IM}}{d\theta} = \frac{dQ_c}{d\theta} + \frac{dQ_p}{d\theta}$$

Q_c est évidemment toujours positif.
Q_p est positif ou négatif selon la température des gaz et celle des parois.

a) *Chaleur libérée par la combustion* (moteur à allumage commandé — combustion normale).

Appelons:

P_i: le pouvoir calorifique inférieur du carburant utilisé ($P_i \approx 10\,200$ kcal/kg pour les supercarburants actuels);

r: la richesse du mélange air-carburant défini comme suit:

$$r = \frac{\dfrac{\text{masse d'air}}{\text{masse de carburant}} \ (\text{mélange utilisé})}{\dfrac{\text{masse d'air}}{\text{masse de carburant}} \ (\text{mélange stœchiométrique})}$$

m_0: la masse d'air contenue dans le cylindre à FA (fermeture admission);

P_c: le pouvoir « comburivore » du carburant (masse d'air nécessaire pour obtenir la combustion complète d'un gramme de carburant);

η_c: le rendement de combustion.

La chaleur globale Q'_c dégagée a pour valeur:

$$Q'_c = r \frac{m_0}{P_c} P_i \eta_c$$

L'expérience montre que l'évolution de la fraction brûlée en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin prend dans tous les cas la forme d'une courbe en *S* qui est assimilable à une fonction sinusoïdale (fig. V-18).

Soit :

A et *B* : les repères angulaires de début et de fin de combustion ;

$\delta\theta$: l'intervalle angulaire correspondant ;

X : la fraction brûlée ;

$$X = \frac{1}{2}\left[1 - \cos\frac{180}{\delta\theta}\,(\theta - \theta_A)\right]$$

(θ est exprimé en degrés)

En formulant l'hypothèse que le dégagement de chaleur est proportionnel à la fraction brûlée nous pouvons écrire :

$$Q_c = X \,.\, Q'_c$$

et :

$$\frac{dQ_c}{d\theta} = \left[\frac{90}{\delta\theta}\sin\frac{180}{\delta\theta}\,(\theta - \theta_A)\right] r\,\frac{m_0}{P_c}\,P_i\,\eta_c \qquad (2)$$

si : $\theta \leqslant \theta_A$ ou $\theta \geqslant \theta_B$ nous avons évidemment : $\dfrac{dQ_c}{d\theta} = 0$

b) *Flux instantané de chaleur par les parois.* — Nous pouvons considérer que l'échange de chaleur entre gaz et parois se fait par convection et rayonnement. Cependant, en raison de la forte turbulence et de la grande masse volumique des gaz, la convection constitue le phénomène qui entraîne l'échange le plus intense et cette circonstance permet d'incorporer le rayonnement au coefficient de convection en utilisant un coefficient d'échange global.

L'étude théorique des échanges par convection est un problème de dynamique des fluides et de thermodynamique. La résolution des équations qui régissent ces phénomènes n'a pu être effectuée que dans des cas très simples et c'est la raison pour laquelle on fait généralement appel à l'expérience dans les cas compliqués.

C'est ainsi que l'on a pris l'habitude de traduire les résultats d'essais en introduisant le coefficient de transmission par convection défini par l'équation :

$$dq = \alpha(T_p - T)\;dS$$

expression dans laquelle :

T : est la température du fluide au voisinage de la paroi ;

T_p : est la température de la paroi ;

dS : est la surface de l'élément de paroi ;

α : est le coefficient de transmission par convection ;

dq : est le flux de chaleur.

L'expérience montre que α est une fonction *f* telle que :

$$\alpha = f(l, \theta, v, C, \sigma, \rho, \mu)$$

l : dimension de référence ;

θ : excès de température de la paroi par rapport au fluide ;

v : vitesse moyenne locale ;
C : chaleur massique ;
σ : conductibilité ;
ρ : masse volumique ;
μ : viscosité dynamique.

(*v*, *C*, σ, ρ, μ : du fluide)

La théorie de la similitude et l'analyse dimensionnelle conduisent à la relation suivante :

$$\frac{\alpha l}{\sigma} = \Sigma A \left(\frac{\mu C}{\sigma}\right)^n \left(\frac{\rho v l}{\mu}\right)^m$$

$\dfrac{\alpha l}{\sigma}$: est le nombre de Biot-Nusselt : *Nu* ou *Bi*

$\dfrac{\rho v l}{\mu}$: nombre de Reynolds : $\mathcal{R}_e$

$\dfrac{\mu C}{\sigma}$: nombre de Prandtl : $\mathcal{P}_r$

Nous avons donc : $N_u = \Sigma A\,\mathcal{P}_r^{\,n}\,\mathcal{R}_e^{\,m}$

On montre par ailleurs qu'en dehors du domaine des basses températures, le nombre $\mathcal{P}_r \# \dfrac{C_p}{C_v}$, rapport des chaleurs massiques à pression constante C_p et à volume constant C_v, ne varie que très peu en fonction de la température. En prenant $\mathcal{P}_r$ constant, nous pouvons écrire :

$$N_u = K \,.\, \mathcal{R}_e^{\,m} \qquad (K = \text{Cte})$$

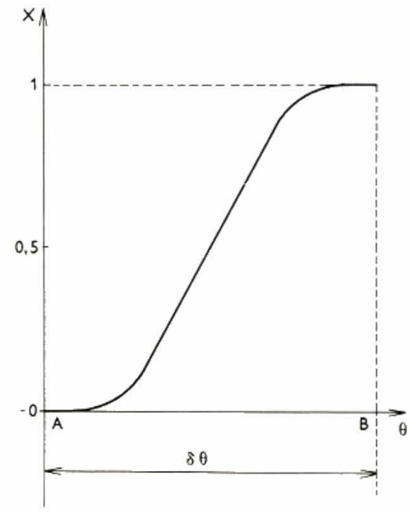


Fig. V-18
Évolution de la fraction brûlée en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin

Dans la suite nous remplacerons le coefficient de convection α par un coefficient d'échange global *h* et nous prendrons pour dimension de référence *l* le diamètre de l'alésage *D*

d'où
$$N_u = \frac{h\,D}{\sigma}\;;\quad \mathcal{R}_e = \frac{\rho v D}{\mu}$$

et :
$$h = C_0 D^{m-1}\,\sigma\,\mu^{-m}\,(\rho v)^m$$

Or :
$$\rho = \frac{p}{RT}\;\mu = a_0\,T^q\;\sigma = a_1\,T^r$$

a_0, q, a_1, r étant des constantes.

d'où :
$$h = C_1\,D^{m-1}\,T^{r-m(1+q)}\,p^m\,v^m \qquad (3)$$

Pour l'air :

$a_0 = 3{,}14 \,.\, 10^{-4}$ $\qquad a_1 = 5{,}28 \,.\, 10^{-8}$

$q = 0{,}62$ $\qquad r = 0{,}75$

La vitesse *v* moyenne du gaz et son évolution en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin ne sont généralement pas connues. Dans son étude expérimentale G. Woschni montre la nécessité de considérer deux expressions distinctes de la vitesse *v* en prenant pour base la vitesse moyenne de piston $\overline{U}$.

— *Cycle sans combustion.* — La vitesse du gaz est engendrée par le mouvement du piston et dans ce cas on peut poser :

$$v = C_2\,U \qquad (4)$$

C_2 est une constante déterminée par l'expérience.

— *Cycle avec combustion.* — Pour tenir compte du mouvement de gaz supplémentaire produit par la combustion on ajoute à la valeur précédente une vitesse *u* aussi bien pour la phase de combustion que pour celle de détente :

$$v = C_2 U + u$$

Woschni aboutit à l'expression empirique suivante :

$$u = C_3\,\frac{V}{V_I}\,\frac{T_I}{p_I}\,(p - p_0) \qquad (5)$$

C_3 est également une constante déterminée par l'expérience (V_I, p_I, T_I : valeurs initiales du volume, de la pression et de la température).

Les relations (3) (4) et (5) définissent entièrement le coefficient d'échange en fonction de *p*, *T* et p_0.

En raison du caractère empirique de ces expressions, il est indispensable de préciser les unités à employer pour leur calcul :

h : en kilocalories par mètre cube par heure et par kelvin ;

D : en mètres ;

T : en kelvins ;

p, p_0, p_I : en bars ;

U : en mètres par seconde ;

C_3 : en mètres par seconde-kelvin ;
C_1 : 1,1 . 10^2 ;
m : 0,8

Woschni donne encore les valeurs suivantes :

— période de balayage : $C_2 = 6{,}18$;
— compression-détente : $C_2 = 2{,}28$;
— combustion-détente : $C_3 = 3{,}24 . 10^{-3}$ m/s . K.

D'autres expressions du coefficient d'échange ont été proposées par différents auteurs :

Nusselt (1923) : $h = 0{,}99\ (1 + 1{,}24\ U)\ \sqrt[3]{p^2 T}$

Briling (1931) : $h = 0{,}99\ (3{,}5 + 0{,}185\ U)\ \sqrt[3]{p^2 T}$

Eichelberg (1939) : $h = 2{,}1\ \sqrt[3]{U} . \sqrt{pT}$

Pflaum (1962) : $h = f_1(p_L)\ f_2(U)\ \sqrt{pT}$

Annaud (1963) :

$$h = 0{,}49 \left(\frac{k}{d}\right) \mathcal{R}_e^{0{,}7} + 0{,}91 \frac{\left[\left(\frac{T}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_p}{100}\right)^4\right]}{T - T_p}$$

Les écarts entre ces différentes formules atteignent parfois 200 %. Toutefois, la concordance entre les résultats d'Eichelberg et de Woschni est assez bonne.

Nous avons vu que le flux élémentaire horaire au travers d'un élément de surface dS a pour valeur :

$$dq = h\ (T_p - T)\ dS$$

en intégrant par rapport à la surface totale d'échange offerte aux gaz on obtient :

$$Q_p = h \sum_i S_i\ (T_{pi} - T)$$

Les surfaces S_i comprennent évidemment : le ciel de piston, la paroi interne du cylindre, la culasse et les soupapes. Les températures T_{pi} sont les températures moyennes de ces parois.

En différentiant l'expression ci-dessus par rapport au temps on obtient :

$$\frac{dQ_p}{dt} = \frac{1}{3\,600}\ h \sum_i S_i\ (T_{pi} - T)$$

comme $dt = \dfrac{d\theta}{6\,N}$ il vient finalement :

$$\frac{dQ_p}{d\theta} = \frac{1 . 10^{-4}}{2{,}16\ N} . h \sum_i S_i\ (T_{pi} - T) \qquad (6)$$

Les relations (1) (2) et (6) permettent de calculer l'évolution de la pression p dans l'intervalle (fermeture admission-ouverture échappement).

5. LA COMBUSTION DANS LES MOTEURS À ALLUMAGE COMMANDÉ

5.1. Dispersion cyclique. — La dispersion des courbes de pression pendant la combustion peut être considérable, et en tout cas n'est jamais négligeable sur les moteurs à allumage commandé. C'est ce que montre (fig. V-19 et V-20) la superposition de diagrammes pression-angle, relevés sur des moteurs monocylindres fonctionnant en régime stabilisé ; nous pouvons observer des écarts de pression importants d'un cycle à l'autre au cours de la combustion. Les diagrammes de la figure V-19 ont été enregistrés sur un moteur lent (2 000 tr/mn), ceux de la figure V-20 sur un moteur rapide (10 000 tr/mn) ; la courbe isolée représente l'évolution de la pression enregistrée au cours d'un cycle sans allumage. La dispersion cyclique de combustion est un phénomène aléatoire dont la principale cause semble provenir des mouvements désordonnés de gaz dans le cylindre ; ils provoquent des fluctuations de l'aire du front de flamme et par conséquent de la vitesse de combustion. Son étude expérimentale fait appel aux méthodes de l'analyse statistique. La figure V-21 montre la distribution des pressions maximales de cycle effectuée sur un échantillonnage de 5 000 cycles à l'aide d'un appareillage de traitement de l'information SEIN.

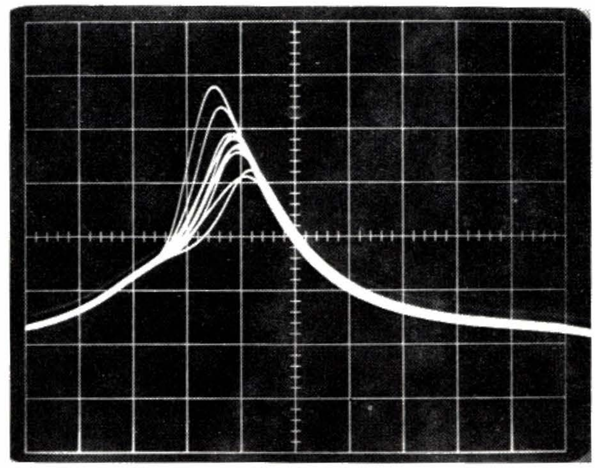


Fig. V-19

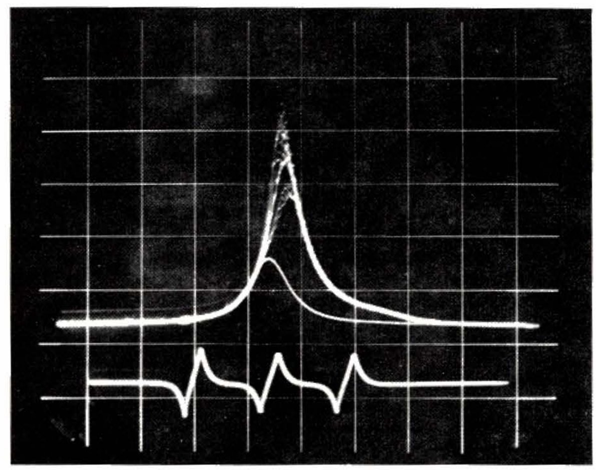


Fig. V-20

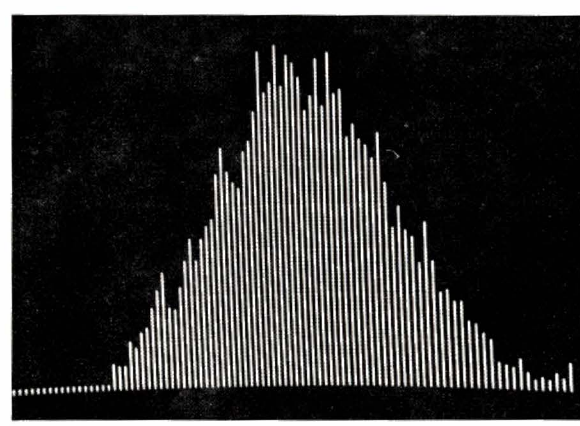


Fig. V-21

La dispersion cyclique observée sur les pressions de combustion se retrouve sur la vitesse moyenne de propagation du front de flamme dont la mesure est facilement accessible à l'expérience. Pour cette mesure on utilise la propriété qu'ont les gaz de devenir conducteurs de l'électricité à haute température et en pratique on a recours à l'emploi d'une bougie d'ionisation soumise à une différence de potentiel d'une centaine de volts et placée à une certaine distance l de la bougie d'allumage. On mesure à l'oscilloscope le temps t séparant le signal d'allumage du signal fournit par la bougie d'ionisation au passage du front de flamme. On obtient ainsi des diagrammes iden-

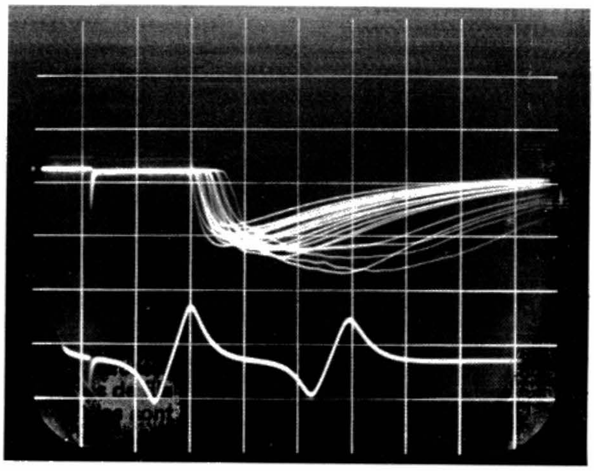


Fig. V-22

tiques à ceux de la figure V-22 permettant de calculer la vitesse moyenne de propagation $\bar{U}_0 = \frac{l}{t}$ sur la distance l.

Il apparaît clairement sur ces diagrammes que la vitesse $\bar{U}_0$ est plus ou moins grande selon les cycles consécutifs. Sa valeur dépend de nombreux paramètres: avance à l'allumage, nature du mélange carburé, etc. L'expérience montre que son évolution avec la vitesse de rotation du moteur est une fonction sensiblement linéaire dont l'accroissement se situe entre 3 et 4 m/s par 1 000 tr/mn. Ce résultat est fondamental car il montre que, dans une certaine mesure, la durée angulaire de la combustion n'est pas un obstacle à l'augmentation de la vitesse de rotation des moteurs en vue d'accroître leurs performances.

5.2. Combustions normales et anormales. — Nous avons déjà vu en quoi consiste la combustion normale dans le moteur à allumage commandé mais il n'est peut-être pas inutile d'en préciser certaines particularités. En fonctionnement normal du moteur, l'allumage est provoqué par l'étincelle qui jaillit entre les électrodes de la bougie et n'intéresse que la masse infime de mélange carburé située au voisinage de l'étincelle. Le noyau de gaz initialement brûlé augmente de volume au fur et à mesure que la flamme se propage dans les gaz frais jusqu'à occuper tout l'espace disponible dans la chambre de combustion et le cylindre. À un instant déterminé de la combustion, l'espace total offert au gaz est donc divisé en deux parties *A* et *B* (fig. V-23) séparées par le front de flamme et contenant respectivement les gaz brûlés et les gaz frais. La température des gaz

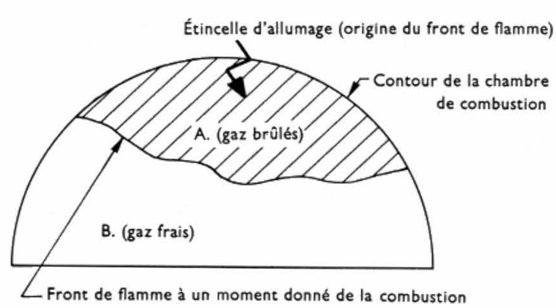


Fig. V-23 — Schéma montrant la propagation du front de flamme

brûlés résulte de la chaleur dégagée par la combustion et son évolution est fonction du mouvement du piston, des échanges de chaleur et de l'augmentation de pression consécutive à la propagation de la combustion. En ce qui concerne la température des gaz frais, son évolution tient aux variations de volume dues au déplacement du piston, aux échanges de chaleur et à l'augmentation de pression provenant de la propagation de la combustion. Le tableau suivant donne les valeurs approximatives de ces différentes températures.

Étapes	Températures	
Avant allumage	600 K	
	Fraction brûlée	
	initialement	finalement
Après combustion de la fraction initiale	2 200 K	600 K
Avant combustion de la fraction finale	3 070 K	835 K
Après combustion de la fraction finale	3 070 K	2 440 K

En pratique la combustion ne répond pas toujours au schéma qui vient d'être donné et elle peut prendre dans bien des cas d'autres formes qui sont qualifiées alors d'anormales. Par définition on appelle combustion anormale « tout phénomène de combustion, affectant la totalité ou une partie du mélange carburé, et qui ne résulte pas de la propagation du front de flamme amorcé par l'étincelle ».

L'évolution technique des moteurs et de leurs conditions d'utilisation ont fait apparaître diverses formes de combustion anormale qui se sont toujours traduites par de graves inconvénients pour les utilisateurs (destruction des soupapes, destruction des joints de culasse, grippage et fusion de piston, etc.). Elles peuvent résulter de l'auto-inflammation du mélange, d'allumages incontrôlés suivis de la propagation de fronts de flamme, de ces deux types de phénomènes à la fois.

a) *Combustion détonante, auto-inflammation.* — Cette forme de combustion anormale se manifeste par un bruit métallique caractéristique appelé « cliquetis » dont la fréquence se situe à environ 5 000 Hz. Elle est due à une auto-inflammation de la masse de gaz frais, contenue dans la partie *B* (fig. V-23) qui brûle pratiquement à volume constant. Il en résulte une élévation de pression locale très importante entraînant des vibrations de grande amplitude pour la masse gazeuse. Ce phénomène s'accompagne de vibrations du moteur et d'une augmentation considérable des échanges de chaleur par les parois. On a pu mettre en évidence la formation progressive de peroxydes et d'aldéhydes précurseurs de l'auto-inflammation pendant la compression et la propagation de la combustion normale. L'apparition et l'intensité du cliquetis sont contrôlables par le calage du point d'allumage. D'autres facteurs sont susceptibles d'avoir une influence sur son origine tels que la pression et la température d'admission, le rapport volumétrique de compression, la vitesse de rotation, la conception de la chambre de combustion, les dépôts dans la chambre en raison de l'augmentation du niveau thermique qu'ils entraînent, la nature chimique du carburant.

b) *Allumage de surface.* — Cette autre forme de combustion anormale se traduit par la formation d'un ou de plusieurs fronts de flamme sur un point chaud différent de l'étincelle d'allumage. Ces fronts se propagent à vitesse normale. Selon que ce phénomène apparaît avant ou après l'étincelle d'allumage il est appelé préallumage ou post-allumage; il peut entraîner l'apparition de la combustion détonante avec cliquetis et l'auto-inflammation permanente, le moteur continuant de tourner allumage coupé. L'allumage sur surface chaude peut apparaître de plus en plus tôt dans le cycle et, dans ce cas, il est généralement dû à des bougies d'allumage surchauffées ou à d'autres éléments de la chambre tels que soupapes d'échappement ou angle saillant.

C'est le type d'allumage par point chaud le plus destructif pour le moteur, il peut évoluer rapidement au point d'entraîner des incidents mécaniques graves tels que: destruction du joint de culasse, destruction des soupapes, grippage, fusion locale allant jusqu'au percement du piston (fig. V-24).



Fig. V-24

Percement de piston par combustion anormale

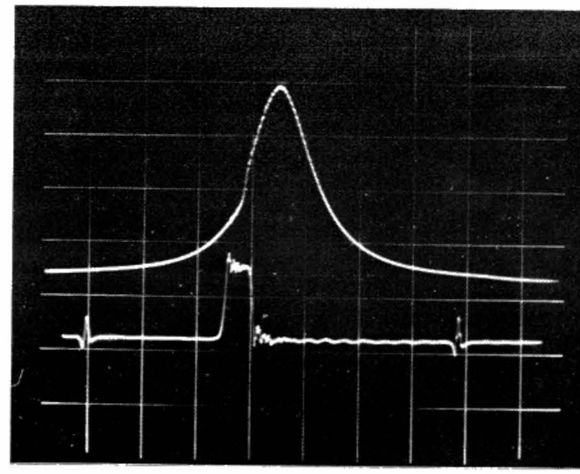


Fig. V-25

Diagrammes montrant l'évolution de la pression dans le cylindre et le déplacement de l'aiguille d'injecteur en fonction de la rotation du vilebrequin

6. LA COMBUSTION DANS LE MOTEUR DIESEL

Dans le moteur Diesel la combustion est la conséquence directe du phénomène d'auto-inflammation du combustible injecté sous forme d'un brouillard dans la masse d'air portée à température élevée par la compression. L'obtention d'une température suffisante (~ 550 °C) pour créer l'auto-inflammation nécessite un rapport volumétrique plus grand que celui du moteur à allumage par étincelle. Si l'injection du combustible est faite dans les conditions propres à produire l'allumage, la combustion a lieu, même pour les faibles valeurs de richesse, contrairement à ce qui se passe dans le moteur à allumage commandé dans lequel la combustion devient instable et même impossible pour les valeurs inférieures à 0,8. En revanche, en raison de l'hétérogénéité du mélange air-combustible, l'utilisation totale de l'air admis n'est pas actuellement possible, ce qui limite la quantité d'énergie libérée par unité de masse d'air admis à une valeur de 20 à 25 % inférieure à ce qu'elle peut être dans le moteur à allumage commandé.

Dans le but de faciliter l'explication du processus de combustion, il convient de donner au préalable les définitions suivantes :

— *Durée d'injection :* temps compté entre le début et la fin de l'injection du combustible dans le cylindre.

— *Angle d'injection :* angle de rotation du vilebrequin correspondant à la durée d'injection.

— *Délai d'allumage :* temps compris entre le début de l'injection et le début de la combustion.

— *Délai angulaire :* angle de rotation correspondant au délai d'allumage.

Le déroulement de la combustion dans le moteur Diesel s'effectue en trois phases. La première phase correspond au délai d'allumage ; durant celle-ci est introduite une fraction plus ou moins grande de la quantité totale de combustible injectée par cycle, selon les conditions thermodynamiques régnant dans le cylindre et suivant l'aptitude plus ou moins grande du combustible à s'auto-enflammer. La seconde phase concorde avec la combustion très rapide (pratiquement à volume constant) du combustible injecté pendant le délai d'allumage. La troisième phase correspond à la combustion de la fraction finale de combustible au fur et à mesure de son introduction dans le cylindre. Il arrive fréquemment, principalement pour les faibles débits de combustible, que la troisième phase soit inexistante ; dans le cas contraire il est possible d'obtenir un certain contrôle de la combustion.

Le diagramme de la figure V-25 a trait à l'évolution de la pression dans le cylindre et à l'ouverture de l'injecteur en

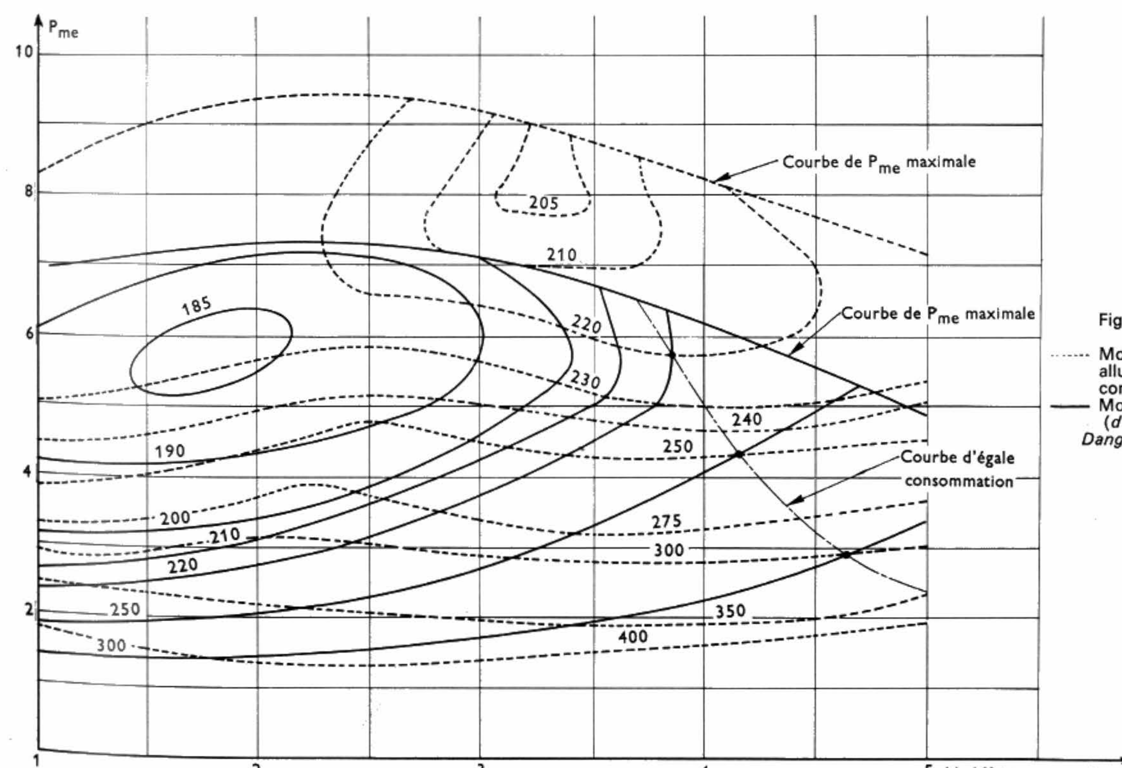


Fig. V-26

------- Moteur à allumage commandé

—— Moteur Diesel (*d'après Dangauthier*)

Réseau d'isoconsommations spécifiques (en grammes par cheval-heure) comparées d'un moteur Diesel et d'un moteur à allumage commandé à carburateur

fonction de la rotation angulaire du vilebrequin. La grande valeur du gradient de pression en début de combustion est très caractéristique du déroulement de la combustion dans le moteur Diesel.

7. CHARGES PARTIELLES

7.1. Moteur à allumage commandé. — On appelle charges partielles les conditions de fonctionnement pour lesquelles le moteur ne développe qu'une fraction de son couple maximal. Ces conditions sont obtenues sur le moteur à allumage commandé en réglant la masse de mélange air-combustible admise à chaque cycle par l'action d'un papillon ou d'une guillotine située à l'amont de l'orifice d'admission. Le laminage d'admission a un triple effet sur le fonctionnement du moteur :

— diminution de la pression, donc de la masse volumique des gaz à *FA* ;

— suppression partielle ou totale des effets dynamiques entraînant la réduction du taux de remplissage ;

— nécessité pour le piston de fournir un travail négatif d'autant plus grand que le couple utile demandé au moteur est faible.

Conformément aux résultats établis au cours de l'étude des cycles, il s'ensuit donc une diminution du rendement global du moteur d'où une augmentation de la consommation spécifique de combustible.

7.2. Moteur Diesel. — La variation du couple est obtenue dans le moteur Diesel en modifiant la quantité de combustible injectée par cycle. Cela est rendu possible par l'aptitude du moteur à fonctionner avec un grand excès d'air. Le remplissage étant indépendant du couple développé le rendement global du moteur Diesel, aux charges partielles, est très nettement supérieur à celui du moteur à allumage commandé. Cette remarque est illustrée par les réseaux d'isoconsommations spécifiques d'un moteur Diesel et d'un moteur à allumage commandé à carburateur, qui sont présentés sur la figure V-26 (page précédente).

CHAPITRE VI

ÉTUDE DYNAMIQUE DU MOTEUR

Ce chapitre complète l'ensemble de l'étude théorique du moteur. Elle a pour but de donner une assise mathématique aux divers choix réalisés lors de l'élaboration des moteurs thermiques. Elle n'est pas indispensable à la compréhension de la suite de l'article. Le lecteur qui le désire peut, dans un premier temps, passer immédiatement à l'étude technologique du moteur.

1. L'ATTELAGE MOBILE DU MONOCYLINDRE. - CINÉMATIQUE DE L'EMBIELLAGE

L'étude de la cinématique de l'embiellage est nécessaire pour le calcul des variations de volume de la cylindrée qui résultent du déplacement du piston et pour les calculs relatifs à la détermination des efforts, à la résistance des organes, à l'équilibrage des forces d'inertie, etc.

1.1. Mouvement du piston et de la bielle (embiellage symétrique, fig. VI-1).

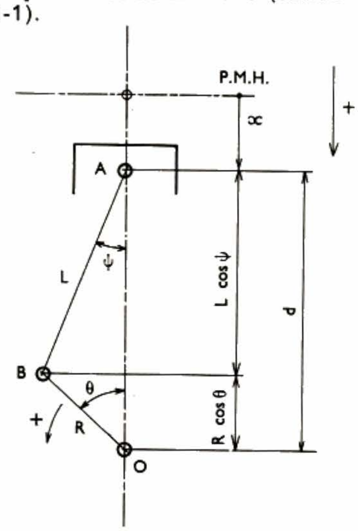


Fig. VI-1

Nous nous proposons de calculer :
- l'élongation du piston d,
- la position instantanée du piston x,
- la vitesse $\frac{dx}{dt}$ (dérivée de x par rapport au temps t),
- son accélération $\frac{d^2x}{dt^2}$ (dérivée seconde de x par rapport au temps t),
- l'obliquité de la bielle ψ,
- la vitesse angulaire $\frac{d\psi}{dt}$ de celle-ci (dérivée de ψ par rapport au temps t).

Soit L l'entraxe de la bielle et R le rayon de manivelle. En projetant le contour ABO sur l'axe passant par A et O nous obtenons :

$$d = R \cos \theta + L \cos \psi$$

Or : $R \sin \theta = - L \sin \psi$ ou : $\sin \psi = - \frac{R}{L} \sin \theta$

d'où : $\cos \psi = \left[1 - \left(\frac{R}{L}\right)^2 \sin^2 \theta\right]^{\frac{1}{2}}$

($\cos \psi$ est toujours ou positif ou nul).

En pratique, le rapport $\frac{R}{L}$ est voisin de 0,3 et $\left(\frac{R}{L}\right)^2 \approx 0{,}1$

Dans ces conditions on montre que l'expression précédente peut être mise sous la forme suivante (développement en série) :

$$\cos \psi = 1 - \frac{1}{2}\left(\frac{R}{L}\right)^2 \sin^2 \theta - \frac{1}{8}\left(\frac{R}{L}\right)^4 \sin^4 \theta - \frac{1}{16}\left(\frac{R}{L}\right)^6 \sin^6 \theta + \dots$$

Or :

$$\sin^2 \theta = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\theta$$

$$\sin^4 \theta = \frac{3}{8} - \frac{1}{2} \cos 2\theta + \frac{1}{8} \cos 4\theta$$

$$\sin^6 \theta = \frac{5}{16} - \frac{15}{32} \cos 2\theta + \frac{3}{16} \cos 4\theta - \frac{1}{32} \cos 6\theta$$

. . . .

d'où :

$$\cos \psi = a'_0 + a'_2 \cos 2\theta + a'_4 \cos 4\theta + a'_6 \cos 6\theta + \dots$$

les coefficients a'_0, a'_1, a'_2, . . . , étant respectivement égaux à :

$$a'_0 = 1 - \left[\frac{1}{4}\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \frac{3}{64}\left(\frac{R}{L}\right)^4 + \frac{5}{256}\left(\frac{R}{L}\right)^6 + \dots\right]$$

$$a'_2 = + \left[\frac{1}{4}\left(\frac{R}{L}\right)^2 + \frac{1}{16}\left(\frac{R}{L}\right)^4 + \frac{15}{512}\left(\frac{R}{L}\right)^6 + \dots\right]$$

$$a'_4 = - \left[\frac{1}{64}\left(\frac{R}{L}\right)^4 + \frac{3}{256}\left(\frac{R}{L}\right)^6 + \dots\right]$$

$$a'_6 = + \left[\frac{1}{512}\left(\frac{R}{L}\right)^6 + \dots\right]$$

Nous en déduisons :

$$d = R\left[\cos \theta + \frac{L}{R}(a'_0 + a'_2 \cos 2\theta + a'_4 \cos 4\theta + \dots)\right]$$

En posant :

$$a_0 = \frac{L}{R} a'_0 ; \; a_2 = \frac{L}{R} a'_2 ; \; a_4 = \frac{L}{R} a'_4, \text{ etc.}$$

nous obtenons :

$$d = R\,(a_0 + \cos \theta + a_2 \cos 2\theta + a_4 \cos 4\theta + a_6 \cos 6\theta + \dots)$$

et :

$$x = R\left[\frac{L}{R} + 1 - (a_0 + \cos \theta + a_2 \cos 2\theta + a_4 \cos 4\theta + \dots + a_{2n} \cos 2n\theta + \dots)\right]$$

La vitesse et l'accélération sont obtenues en dérivant x par rapport au temps. La vitesse angulaire $\omega = \dfrac{d\theta}{dt}$ étant supposée constante, nous obtenons :

$$\frac{dx}{dt} = \omega R\,(\sin\theta + 2\,a_2 \sin 2\,\theta + 4\,a_4 \sin 4\,\theta + \ldots)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \omega^2 R\,(\cos\theta + 4\,a_2 \cos 2\,\theta + 16\,a_4 \cos 4\,\theta + \ldots)$$

Le principal intérêt du développement en série est de permettre un calcul facile et précis de la somme des accélérations de n pistons liés à des manivelles faisant entre elles des angles égaux à $\dfrac{2\,\pi}{n}$.

— *Expressions approchées du mouvement du piston.* — En ne conservant que les premiers termes en $\cos\theta$ et $\cos 2\,\theta$, nous obtenons :

$$x \approx R\left[1 - \cos\theta + \frac{1}{4}\frac{R}{L}(1 - \cos 2\,\theta)\right]$$

$$\frac{dx}{dt} \approx \omega R\left[\sin\theta + \frac{1}{2}\frac{R}{L}\sin 2\,\theta\right]$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} \approx \omega^2 R\left[\cos\theta + \frac{R}{L}\cos 2\,\theta\right]$$

— *Valeur approchée de la vitesse maximale v_M* du piston. La vitesse est maximale si $(\cos\theta + \frac{R}{L}\cos 2\,\theta) = 0$, ce qui correspond en pratique à l'angle θ pour lequel $\overline{AB}$ est perpendiculaire à $\overline{OB}$. Ainsi :

$$v_M = \pm\,\omega R\sqrt{1 + \left(\frac{R}{L}\right)^2} \approx \pm\,\omega R$$

La vitesse maximale du piston est donc peu différente de la vitesse circonférentielle du centre de la tête de bielle.

— *Valeurs extrêmes approchées de l'accélération du piston :* γ_M et γ_m.

- $\dfrac{L}{R} > 4$: les valeurs maximales sont obtenues au P.M.H. et au P.M.B.

$$\gamma_M = \omega^2 R\left(1 + \frac{R}{L}\right) \text{ au } \textit{P.M.H.}$$

$$\gamma_m = -\,\omega^2 R\left(1 - \frac{R}{L}\right) \text{ au } \textit{P.M.B.}$$

- $\dfrac{L}{R} < 4$: il y a un autre maximum pour $\cos\theta = -\dfrac{L}{4\,R}$

— *Obliquité et vitesse angulaire de la bielle.*

De la relation $\sin\psi = -\dfrac{R}{L}\sin\theta$ nous tirons l'angle d'obliquité de la bielle : $\psi = \text{Arc}\sin\left(-\dfrac{R}{L}\sin\theta\right)$. En dérivant cette expression par rapport au temps nous obtenons l'expression de la vitesse angulaire :

$$\frac{d\psi}{dt} = -\,\omega R\,\frac{\cos\theta}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{R}{L}\right)^2 \sin 2\,\theta}}$$

1.2. Définition d'un système dynamiquement équivalent à la bielle. — Le mouvement d'un point quelconque de la bielle résulte de la composition de deux mouvements :

— translation de l'axe de pied de bielle (point A) ;
— rotation de l'axe de la tête de bielle (point B).

Il s'ensuit un mouvement complexe de son centre de gravité.

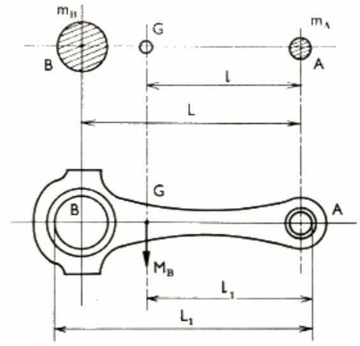


Fig. VI-2
Système dynamiquement équivalent à la bielle

Un système dynamiquement équivalent à la bielle est tel que ce système et la bielle ont (fig. VI-2) :

— même masse totale M_B : $m_A + m_B = M_B$
— même centre de gravité : $m_A . l = m_B\,(L - l)$
— même moment central d'inertie :

$$m_A l^2 + m_B\,(L - l)^2 = I_G$$

Ces trois conditions étant généralement incompatibles on convient en pratique de satisfaire aux deux premières ; une faible erreur entache ainsi le moment central d'inertie. Dans ces conditions il vient :

$$m_B = M_B \frac{l}{L} \quad \text{et} \quad m_A = M_B\left(1 - \frac{l}{L}\right)$$

et la troisième relation s'écrit :

$$I'_G = M_B l\,(L - l)\ I_G \qquad \text{(en général } I'_G > I_G\text{)}$$

Deux cas sont à considérer pour la détermination de la masse de la bielle et de la position de son centre de gravité :

1° *Il s'agit d'un moteur en étude dont le dessin de la bielle est connu.* — Dans ce cas, les coupes perpendiculaires à l'axe longitudinal permettent d'obtenir par planimétrage et par intégration : le volume, la position du centre de gravité et le moment d'inertie.

Nous en déduisons : M_B, l, m_A et m_B.

Par ailleurs si ρ est le rayon de giration défini par la relation $\rho^2 = \dfrac{M_B}{I_G}$ et si nous posons $\Delta I_G = I'_G - I_G$, nous trouvons :

$$\Delta I_G = M_B\,[l\,(L - l) - \rho^2]$$

2° *Il s'agit d'une bielle existante.* — Dans ce deuxième cas, il faut pratiquer le double pendulage (rotation autour du pied puis de la tête de bielle) en mesurant les deux périodes d'oscillation.

Si T_A et T_B sont les périodes d'oscillation mesurées, la formule de la période du pendule simple synchrone et celle du pendule composé que constitue la bielle nous donnent :

$$T_A = 2\,\pi\sqrt{\frac{\mathcal{L}_A}{g}} = 2\,\pi\sqrt{\frac{I_A}{M_B . g . l_1}}$$

$$T_B = 2\,\pi\sqrt{\frac{\mathcal{L}_B}{g}} = 2\,\pi\sqrt{\frac{I_B}{M_B . g . (L_1 - l_1)}}$$

d'où : $$\mathcal{L}_A = T_A^2 \frac{g}{4\,\pi^2} \text{ et } \mathcal{L}_B = T_B^2 \frac{g}{4\,\pi^2}$$

$\mathcal{L}_A$ et $\mathcal{L}_B$ représentant les longueurs des pendules simples correspondants, et g désignant l'accélération terrestre ;

or :

$$I_A = I_G + M_B l_1^2 = M_B . l_1 . \mathcal{L}_A$$

$$I_B = I_G + M_B\,(L_1 - l_1)^2 = M_B\,(L_1 - l_1)\,\mathcal{L}_B$$

D'où :

$$l_1\,(\mathcal{L}_A - l_1) = (L_1 - l_1)\,[\mathcal{L}_B - (L_1 - l_1)]$$

et : $$l_1 = \frac{L_1}{1 + \dfrac{\mathcal{L}_A - L_1}{\mathcal{L}_B - L_1}}$$

ce qui définit la position du centre de gravité.

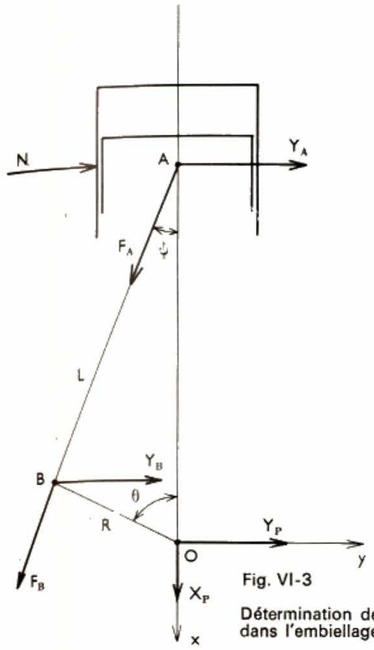


Fig. VI-3
Détermination des efforts dans l'embiellage

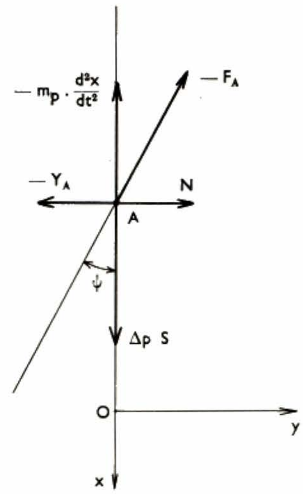
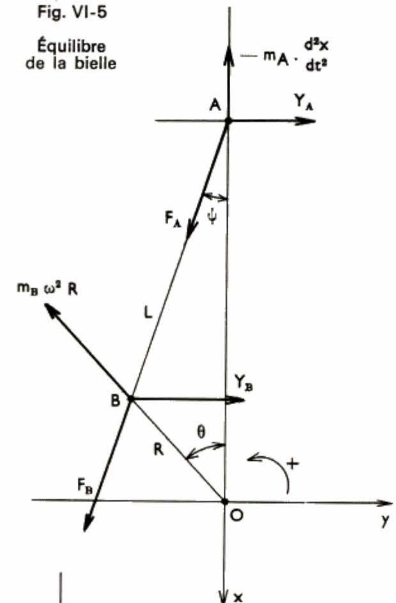


Fig. VI-4
Équilibre du piston

Fig. VI-5
Équilibre de la bielle



1.3. Détermination des efforts dans l'embiellage.

Cette étude a pour but de calculer les valeurs des actions mutuelles entre les différents organes. Nous négligerons l'effet du poids des pièces et du frottement ainsi que le couple d'inertie résiduel dû au remplacement de la bielle par un système à deux masses. D'une façon générale, nous écrirons, conformément au principe de d'Alembert, que chaque organe est à tout instant en équilibre sous l'action :

— des forces directement appliquées (pression des gaz) ;
— des forces de liaison, c'est-à-dire des réactions des appuis ;
— des forces d'inertie.

a) *Notations* (fig. VI-3) :

N: réaction du cylindre sur le piston; sens positif Oy;
F_A et Y_A: composantes suivant AB et Oy pris comme sens positifs de la réaction du piston sur la bielle;
F_B et Y_B: composantes selon les mêmes directions de la réaction du maneton sur la bielle;
X_P et Y_P: composantes suivant Ox et Oy de la réaction en O des paliers sur les tourillons du vilebrequin.

b) *Équilibre du piston* (fig. VI-4).

Forces directement appliquées : effort de la pression des gaz $\Delta p\, S$ suivant Ox (Δp : écart des pressions sur les deux faces du ciel de piston).

Forces de liaison : réaction du cylindre N; réaction de la bielle $-F_A$ et $-Y_A$.

Force d'inertie : due à la masse du piston équipé $-m_P \cdot \dfrac{d^2x}{dt^2}$

• Projection sur Ox: $\Delta p\, S - m_P \dfrac{d^2x}{dt^2} - F_A \cos\psi = 0$ (1)

• Projection sur Oy: $N - F_A \sin\psi - Y_A = 0$ (2)

c) *Équilibre de la bielle* (fig. VI-5).

Forces de liaison : réaction du piston : F_A et Y_A; réaction du maneton : F_B et Y_B.

Force d'inertie due à la masse de bielle en translation : $-m_A \dfrac{d^2x}{dt^2}$ suivant Ox.

Force d'inertie due à la masse de bielle en rotation : $m_B\omega^2 R$ suivant $\overline{OB}$.

• Projection suivant Ox:

$$(F_A + F_B)\cos\psi - m_A \frac{d^2x}{dt^2} - m_B\omega^2 R = 0 \quad (3)$$

• Projection suivant Oy:

$$Y_A + Y_B + (F_A + F_B)\sin\psi - m_B\omega^2 R \sin\theta = 0 \quad (4)$$

Moment par rapport à B des forces appliquées en A:

$$-Y_A L \cos\psi - m_A \frac{d^2x}{dt^2} L \sin\psi = 0 \quad (5)$$

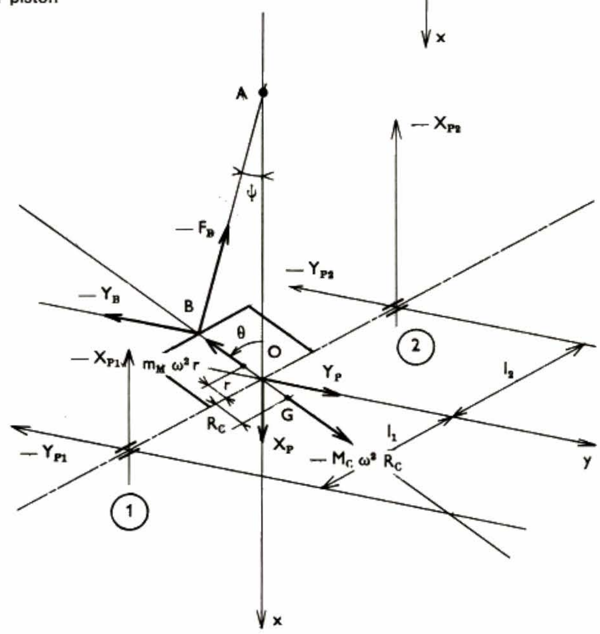


Fig. VI-6 — Équilibre de la manivelle

Les équations (1) à (5) permettent de définir les cinq forces de liaison inconnues F_A, Y_A, F_B, Y_B et N.

En résolvant nous obtenons :

$$F_A = \left(\Delta p\, S - m_P \frac{d^2x}{dt^2}\right) \cdot \frac{1}{\cos\psi}$$

$$Y_A = -m_A \frac{d^2x}{dt^2} \operatorname{tg}\psi$$

$$N = \left[\Delta p . S - (m_A + m_P) \frac{d^2x}{dt^2}\right] \operatorname{tg}\psi$$

$$F_B = \left[(m_A + m_P) \frac{d^2x}{dt^2} + m_B\omega^2 R \cos\theta\,\psi - \Delta p . S\right] \frac{1}{\cos\psi}$$

$$Y_B = m_B\omega^2 R \frac{\sin(\theta - \psi)}{\cos\psi}$$

d) *Équilibre de la manivelle* (fig. VI-6).

Forces de liaison : réactions de la bielle sur le maneton : $-F_B$ et Y_B; réactions des paliers X_P et Y_P.

Forces d'inertie dues :

— à la masse m_M du maneton et des bras de vilebrequin suivant $\overline{OB}$ pris comme sens positif : $m_M\omega^2 r$, r est la distance du centre de gravité de la masse m_M à l'axe du vilebrequin ;

— à la masse résultante des contrepoids d'équilibrage (V. § 1.4) : — $M_C\omega^2 R_C$ dirigée suivant $\overline{OB}$;

- projections sur Ox:

$$X_P - F_B \cos\psi + (M_C R_C - m_M r)\,\omega^2 \cos\theta = 0$$

- projections sur Oy:

$$Y_P - F_B \sin\psi + (M_C R_C - m_M r)\,\omega^2 \sin\theta - Y_B = 0$$

D'où :

$$X_P = F_B \cos\psi - (M_C R_C - m_M r)\,\omega^2 \cos\theta$$
$$Y_P = F_B \sin\psi - (M_C R_C - m_M r)\,\omega^2 \sin\theta + Y_B$$

e) *Efforts transmis aux paliers.* — En désignant par : — X_{P_1} et — Y_{P_1} les composantes de la réaction de la manivelle sur le palier 1, par — X_{P_2} et — Y_{P_2} les composantes de la même réaction sur le palier 2, par l_1 et l_2 les distances respectives du centre des paliers 1 et 2 par rapport à O, il vient :

$$X_{P_1} + X_{P_2} = -X_P$$
$$Y_{P_1} + Y_{P_2} = -Y_P$$
$$X_P . l_1 = -X_{P_2}\,(l_2 + l_1)$$
$$Y_P . l_1 = -Y_{P_2}\,(l_2 + l_1)$$

D'où :

$$X_{P_1} = -X_P \frac{l_2}{l_2 + l_1} \qquad X_{P_2} = -X_P \frac{l_1}{l_2 + l_1}$$

$$Y_{P_1} = -Y_P \frac{l_2}{l_2 + l_1} \qquad Y_{P_2} = -Y_P \frac{l_1}{l_2 + l_1}$$

1.4. Équilibrage des forces d'inertie. — Les forces d'inertie se subdivisent en deux catégories :

— Les forces d'inertie centrifuges résultant de la masse de la partie de bielle en rotation et de la masse du coude de vilebrequin $(m_B + m_M)$.

— Les forces d'inertie alternatives produites par les masses du piston équipé et de son axe, majorées de la masse correspondant à la partie de bielle en translation $(m_A + m_P)$.

a) *Effet et équilibrage des forces d'inertie centrifuges.* — Nous avons vu que si la vitesse angulaire est constante ces forces sont d'amplitude constante et dirigées suivant $\overline{OB}$. Leur résultante est constante en grandeur $\omega^2\,(m_B R + m_M r)$; elle tourne à la vitesse ω avec la manivelle et produit donc sur les paliers de ligne d'arbre une pression de valeur constante, cause d'une perte de travail par frottement. Cette pression se transmet évidemment aux attaches du moteur et entraîne en conséquence des vibrations nuisibles au fonctionnement et à la tenue mécanique de l'ensemble. On annule ces effets en ajoutant aux deux bras du vilebrequin deux contrepoids identiques disposés de telle sorte que le centre de gravité de toutes ces masses se trouve sur l'axe de rotation par rapport au centre du pied de bielle.

Si nous appelons R_c la distance du centre de gravité des contrepoids par rapport à l'axe du vilebrequin, cette condition est réalisée en donnant à l'ensemble des deux contrepoids une masse égale à : $m_B . \dfrac{R}{R_c}$.

b) *Effet et équilibrage des forces d'inertie alternatives.* — Si nous supposons toujours la vitesse angulaire constante, la force d'inertie alternative a pour valeur :

$$-(m_B + m_A)\,\frac{d^2x}{dt^2} =$$

$$-M_A\omega^2 R\,(\cos\theta + 4\,a_2 \cos 2\theta + 16\,a_4 \cos 4\theta + \ldots)$$

avec : $\qquad M_A = (m_B + m_A)$

La force d'inertie alternative se subdivise donc en une force d'inertie primaire (terme en cos θ) dont la période est 2π, en une force d'inertie secondaire de période π, etc. La composante suivant Ox de cette force atteint des valeurs maximales importantes et l'effort correspondant a pour effet d'ébranler ou d'exciter, selon le mode de fixation choisi, les attaches du moteur.

La force d'inertie primaire peut être équilibrée partiellement en augmentant dans la même proportion la masse des contrepoids prévus pour compenser la force d'inertie centrifuge.

Soit (fig. VI-7a) :

m_C : la masse supplémentaire résultante ;

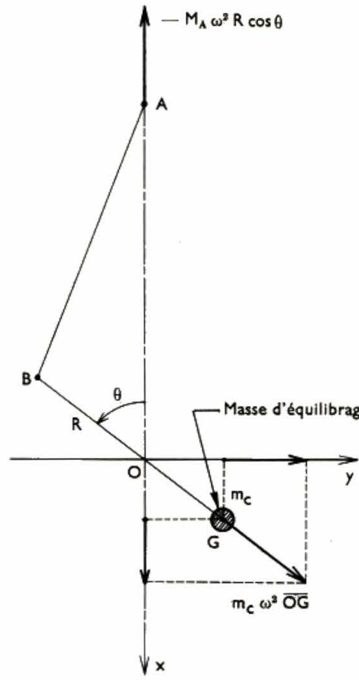


Fig. VI-7 a

Équilibrage partiel de la force d'inertie primaire

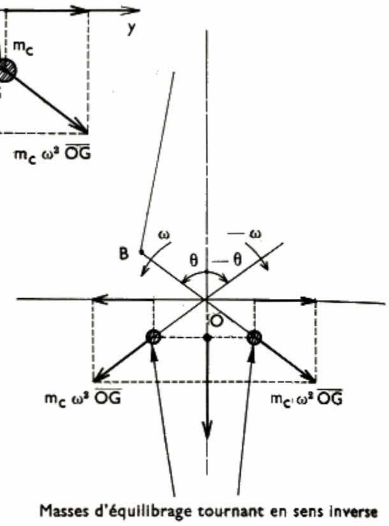


Fig. VI-7 b

Équilibrage total de la force d'inertie primaire

R_C : la distance de son centre de gravité à l'axe du vilebrequin.

À la vitesse ω la force centrifuge due à m_C a pour valeur : $m_C\,\omega^2 R_C$

Ses projections sur Ox et Oy valent respectivement :

$$m_C\,\omega^2 R_C \cos\theta \text{ et } m_C\omega^2 R_C \sin\theta$$

La composante suivant Ox équilibrerait donc complètement la force d'inertie primaire si : $m_C R_C = M_A . R$ mais un effort de valeur $M_A\omega^2 R_C \sin\theta$ serait dirigé suivant Oy. En pratique on équilibre à 50 % la force d'inertie primaire, ce qui conduit à prendre :

$$m_C = \frac{1}{2}\,M_A\,\frac{R}{R_C}$$

L'équilibrage rigoureux est cependant possible en disposant une deuxième masse d'équilibrage m_C tournant en sens inverse du vilebrequin (fig. VI-7 b). En effet, dans ce cas, les composantes suivant Oy s'annulent alors que celles suivant Ox s'ajoutent. Cette solution qui complique évidemment la technologie du moteur est, en général, indispensable sur un monocylindre rapide.

L'équilibrage des forces d'inertie d'ordre 2, 4, etc. peut en principe être réalisé par le même procédé avec des contrepoids tournant à 2 ω, 4 ω mais étant donné leur amplitude rapidement décroissante, cette complication n'est généralement pas nécessaire.

1.5. Courbes polaires des efforts sur les articulations. — Les calculs qui précèdent permettent de tracer les diagrammes polaires des efforts ou des pressions de contact appliqués au coussinet, au maneton et aux paliers. Les courbes polaires sont nécessaires à l'étude des conditions d'usure des articulations ; elles permettent de définir les valeurs maximales et moyennes des réactions relatives à chaque élément, de calculer le travail de frottement correspondant à un cycle, etc.

1.5.1. Diagramme polaire des efforts sur le coussinet. — En désignant par BXY un système d'axes rectangulaires liés à la bielle (fig. VI-8 a), nous obtenons les composantes de l'effort résultant sur le coussinet par les relations suivantes :

$$X = F_B + Y_B \sin \psi$$
$$Y = Y_B \cos \psi$$

1.5.2. Diagramme polaire des efforts sur le maneton. — Soit un autre système d'axes rectangulaires BX_1Y_1 (fig. VI-8 b) lié au maneton ; les composantes de l'effort résultant appliqué au maneton sont égales à :

$$X_1 = F_B \sin (\theta - \psi) - Y_B \cos \theta$$
$$Y_1 = F_B \cos (\theta - \psi) + Y_B \sin \theta$$

La figure VI-9 montre le diagramme polaire des efforts résultants appliqués au maneton d'un moteur monocylindre rapide au régime de rotation maximal. Il apparaît clairement sur ce diagramme que les charges maximales sont dues à l'influence des forces d'inertie. Notons également les angles d'application des différentes catégories de forces.

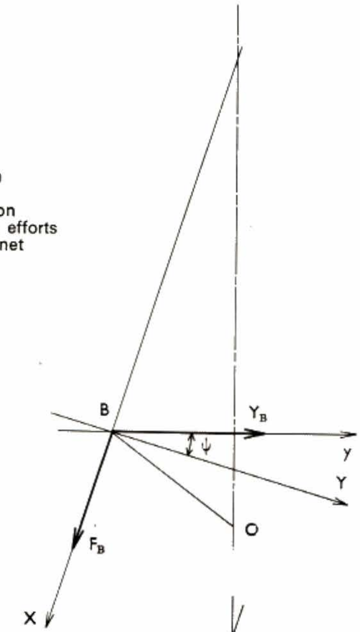


Fig. VI-8 a

Détermination de la polaire des efforts sur le coussinet

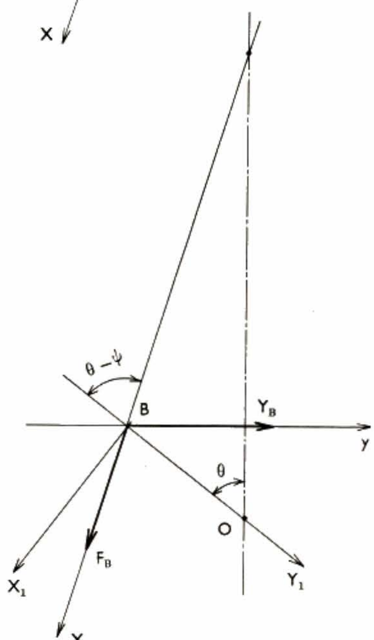


Fig. VI-8 b

Détermination de la polaire des efforts sur le maneton

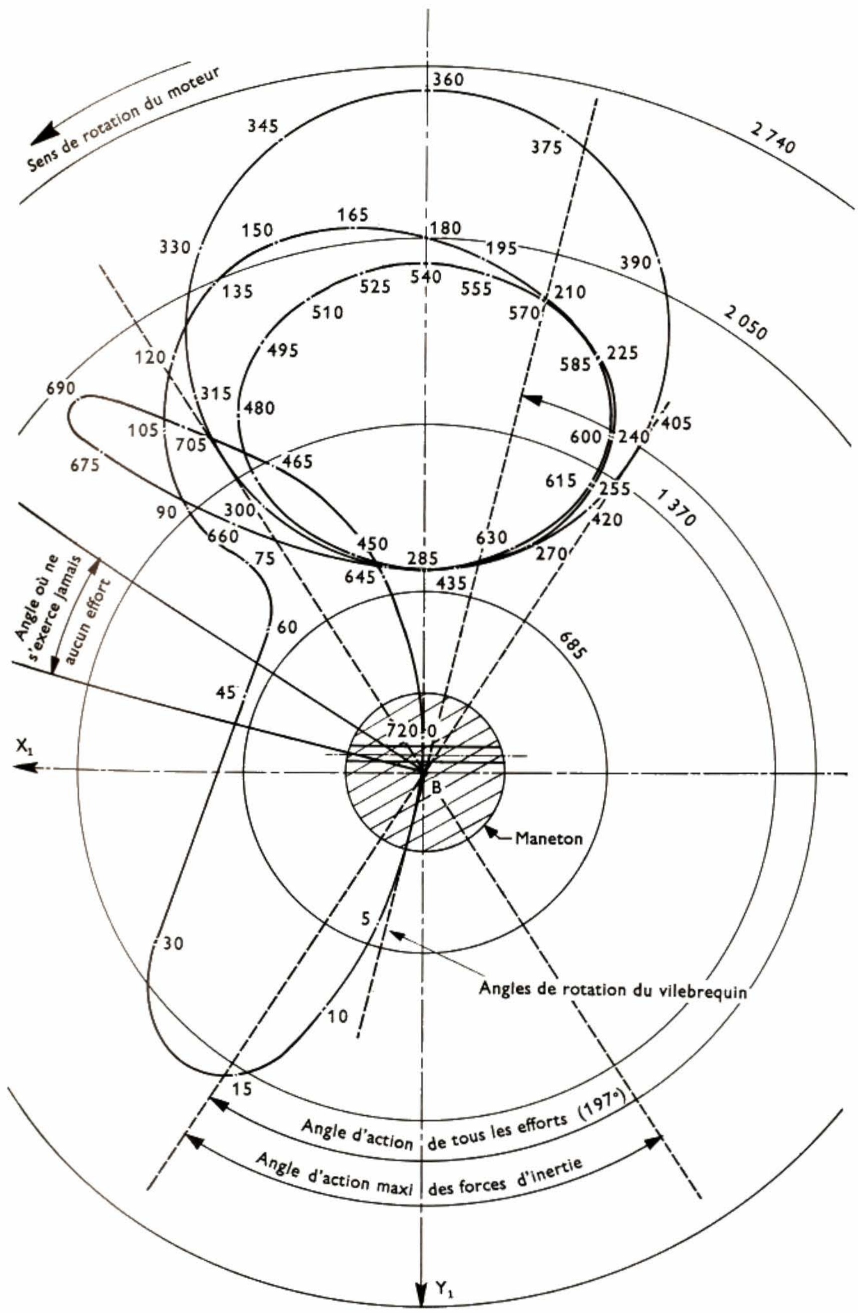


Fig. VI-9

Diagramme polaire des efforts résultants sur le maneton. Les efforts sont exprimés en décanewtons. Fréquence de rotation : N = 10 000 tr/mn

1.6. Calcul du couple moteur et du couple de renversement. — Le théorème des travaux virtuels permet d'écrire directement l'expression du moment du couple moteur.

Soit (fig. VI-10) :

F : la force résultante appliquée au point A ;
T : le moment du couple moteur.

$$F dx = T d\theta$$

d'où :

$$T = F . \frac{dx}{d\theta}$$

comme : $\frac{dx}{d\theta} = \frac{1}{\omega} \frac{dx}{dt}$ et $\frac{dx}{dt} \approx \omega R \left(\sin\theta + \frac{1}{2}\frac{R}{L}\sin 2\theta\right)$

il vient :

$$T \approx F . R \left(\sin\theta + \frac{1}{2}\frac{R}{L}\sin 2\theta\right)$$

avec :

$$F = \Delta p . S - (m_A + m_P) \frac{d^2x}{dt^2}$$

La figure VI-11 représente les variations de la valeur instantanée du moment du couple moteur d'un moteur monocylindre tournant à 3 000 tr/mn. Nous avons distingué le couple dû à l'effort des gaz et le couple dû aux forces d'inertie de manière à montrer leur influence sur le couple résultant. Il est évident que sur un cycle complet la valeur moyenne du moment du couple dû aux inerties est nulle.

Dans le cas de la figure VI-10, le couple T a également pour valeur : $T = F_1 . a$

Or : $F_1 = \frac{F}{\cos\psi}$ et : $a = R \sin(\theta - \psi)$

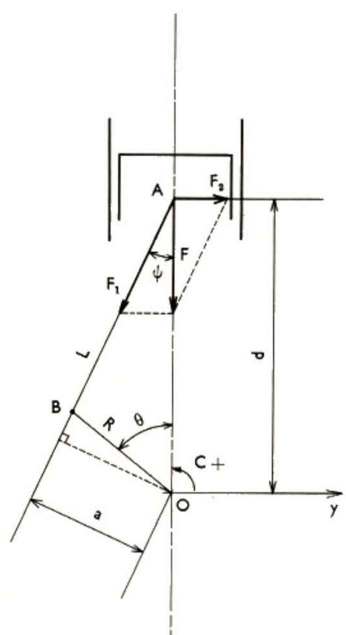


Fig. VI-10

Détermination du couple moteur et du couple de renversement

d'où :

$$T = F . R \frac{\sin(\theta - \psi)}{\cos\psi}$$

Quant au moment du couple de renversement T_r il est évidemment égal au produit de la composante F_2 par la distance d :

$$d = R\cos\theta + L\cos\psi$$

et :

$$F_2 = F \operatorname{tg}\psi$$

d'où :

$$T_r = \frac{FR}{\cos\psi} \left(\cos\theta\sin\psi + \frac{L}{R}\cos\psi\sin\psi\right)$$

Comme :

$$\sin\psi = -\frac{R}{L}\sin\theta$$

nous obtenons finalement :

$$T_r = -FR \frac{\sin(\theta - \psi)}{\cos\psi}$$

Le couple de renversement est égal en valeur absolue au couple moteur.

Le couple moteur est une grandeur périodique décomposable en série de Fourier. Mis sous cette forme il a pour expression :

$$T = |C_0| + |C_1| \sin(\omega t + \varphi_1) + |C_2| \sin(2\omega t + \varphi_2) + \ldots$$

$$= \sum_{k=0}^{k=\infty} |C_k| \sin(k\omega t + \varphi_k)$$

Les termes C_0, C_1, C_2, etc., désignant des constantes.

Le premier terme $|C_0|$ de cette série représente la valeur moyenne du moment du couple au cours d'un cycle. Les termes suivants constituent, chacun, l'un des harmoniques d'amplitude C_1, C_2... La pulsation est égale à : $\omega = \frac{2\pi}{T}$ si T est la période fondamentale du phénomène. Comme $t = \frac{\theta}{\omega}$ nous pouvons écrire : $\omega t = \frac{2\pi\theta}{\omega T}$. Pour un moteur à quatre temps $T = \frac{120}{N}$ et $\omega = \frac{\pi N}{30}$, d'où $\omega t = \frac{\theta}{2}$; cela signifie qu'au terme de rang 1 correspond l'harmonique $\frac{1}{2}$, qu'au terme de rang 2 correspond l'harmonique 1 et ainsi de suite. Pour le moteur à deux temps, il y a identité entre le rang du terme et l'ordre de l'harmonique.

La figure VI-12 donne une image des premiers termes du développement harmonique du couple moteur correspondant au cycle à quatre temps.

Il existe de nombreux procédés pour effectuer la décomposition en série de Fourier d'un phénomène périodique mais le moyen le plus rapide est sans doute à l'heure actuelle l'utilisation de l'ordinateur.

Le développement harmonique du couple moteur est nécessaire à l'étude des vibrations de torsion du vilebrequin comme nous le verrons au paragraphe 3

1.7. Régulation cyclique du couple moteur. — L'irrégularité du couple entraîne évidemment des variations de la vitesse de rotation instantanée auxquelles on remédie généralement grâce à l'artifice du volant d'inertie.

L'équation d'équilibre dynamique du vilebrequin peut être obtenue directement par l'application du théorème des forces vives.

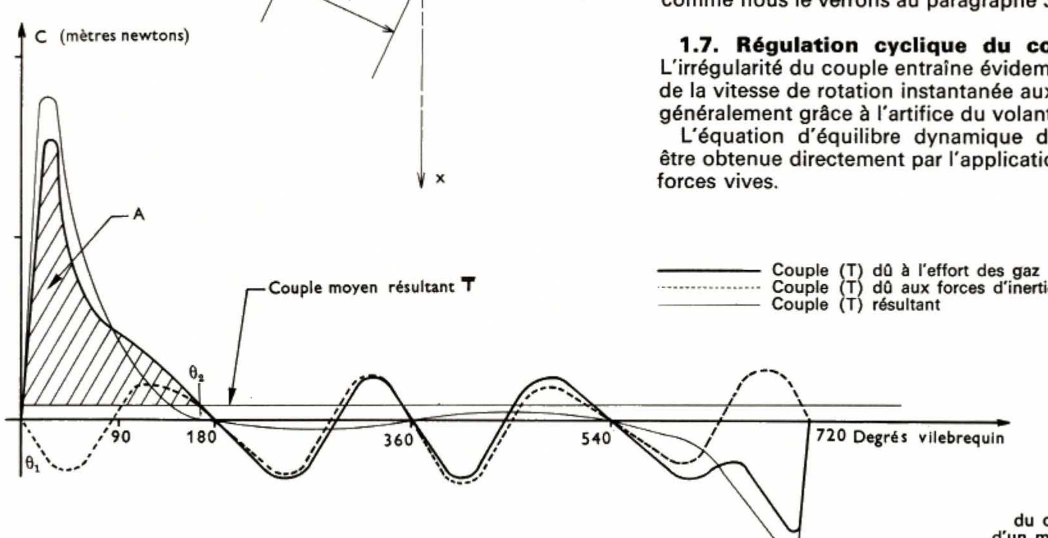


Fig. VI-11

Évolution du couple instantané d'un moteur monocylindre

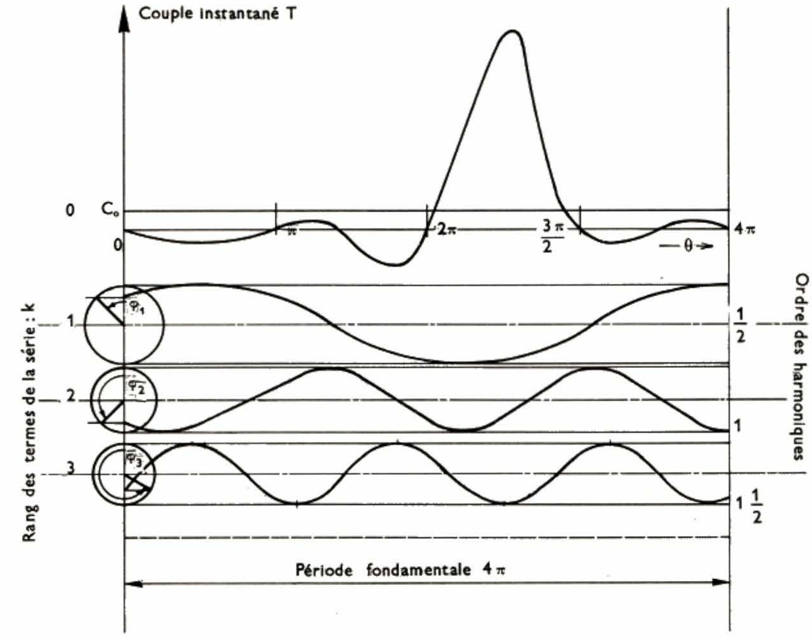


Fig. VI-12

Décomposition en série du couple moteur instantané

Désignons par T_M le moment du couple moteur et par T_R le moment du couple résistant correspondant à la réaction de l'arbre entraîné par le moteur. Dans un mouvement de rotation, pour une variation angulaire $d\theta$ le travail élémentaire est égal à $Td\theta$; on a :

$$(T_M - T_R)\, d\theta = \frac{1}{2}\, d(\Sigma mv^2)$$

$\frac{1}{2} d\,(\Sigma mv^2)$ représente la variation d'énergie cinétique des pièces en mouvement de translation et de rotation.

Si I est le moment d'inertie résultant, rapporté à l'axe du vilebrequin, de toutes les masses du moteur en mouvement de rotation, leur énergie cinétique a pour valeur :

$$e_1 = \frac{1}{2} I\omega^2$$

En ce qui concerne les masses en translation nous savons que la vitesse v est, à un instant donné, fonction de l'angle de rotation θ et proportionnelle à ωR. L'expression de leur énergie cinétique peut donc se mettre sous la forme :

$$e_2 = \frac{1}{2} f(\theta)\, \omega^2$$

L'équation générale s'écrit donc :

$$(T_M - T_R)\, d\theta = \frac{1}{2}\, d\{[I + f(\theta)]\omega^2\}$$

ce qui donne en intégrant pour une rotation de θ_1 à θ_2 (V. fig. VI-11) :

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} (T_M - T_R) d\theta = \frac{1}{2}\{[I + f(\theta_2)]\omega_2^2 - [I + f(\theta_1)\omega_1^2]\}$$

Coefficient d'irrégularité cyclique (*définition du volant*). — Si ω_M et ω_m sont respectivement les vitesses instantanées maximales et minimales au cours d'un cycle et si ω est la vitesse angulaire moyenne, le coefficient d'irrégularité cyclique est le rapport :

$$i = \frac{\omega_M - \omega_m}{\omega}$$

Admettons pour simplifier que $f(\theta)$ est négligeable devant I (ce que l'on fait couramment en pratique) et remplaçons le couple résistant T_R par le couple moteur moyen $\overline{T}$ constant, l'équation d'équilibre dynamique entre les deux abscisses θ_1 et θ_2 correspondant à l'aire maximale sous-tendue à la courbe de couple s'écrit :

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} (T_M - \overline{T})\, d\theta = \frac{1}{2} I(\omega_2^2 - \omega_1^2) = A$$

A : aire hachurée (V. fig. VI-11)

Or : $\omega_1 = \omega_m$ et $\omega_2 = \omega_M$

d'où : $\omega_2^2 - \omega_1^2 = (\omega_M + \omega_m)\,(\omega_M - \omega_m) = \frac{2A}{I}$

Comme, approximativement : $\omega = \frac{\omega_M + \omega_m}{2}$

nous en déduisons : $\omega_M - \omega_m = \frac{A}{\omega I}$

et : $i = \frac{A}{\omega^2 I}$

Pour réduire l'irrégularité cyclique, il faut donc augmenter le régime ou augmenter l'inertie I. Ce dernier résultat est obtenu en ajoutant aux pièces en mouvement de rotation « le volant ».

Soit i_1 le maximum admis pour le coefficient d'irrégularité cyclique et I_v le moment d'inertie polaire du volant,

il faut avoir : $i_1 = \frac{A}{(I + I_v)\,.\,\omega^2}$

soit : $I_v = I\left(\frac{i}{i_1} - 1\right)$

2. L'ATTELAGE MOBILE DU POLYCYLINDRE

2.1. Considérations concernant l'extrapolation des résultats de l'étude du monocylindre au polycylindre. — Quelle que soit la disposition choisie, le moteur polycylindre peut être considéré comme résultant de l'assemblage d'un nombre plus ou moins grand de monocylindres. En ce qui concerne la cinématique de l'embiellage, les résultats qui précèdent sont applicables au polycylindre à l'exception toutefois des embiellages articulés pour lesquels les équations du mouvement des biellettes et des pistons correspondants sont différentes (moteurs d'avion en étoile et certains types de gros moteurs Diesel).

Les effets des forces déjà étudiées se composent pour les divers cylindres. Ils tendent à transmettre au carter moteur, considéré comme un ensemble indéformable, d'une part, en ce qui concerne les résultantes de ces forces, des mouvements oscillatoires, appelés mouvements de tamis et de pilon et, d'autre part, en ce qui concerne les moments résultants, des mouvements de rotation oscillants, appelés mouvements de lacet, de roulis et de tangage (ou galop).

Nous avons vu à propos des forces d'inertie centrifuges qu'il était possible d'équilibrer individuellement chaque attelage par l'emploi de contrepoids ajoutés aux manivelles.

En fait, l'équilibrage peut généralement être réalisé plus simplement si les différents attelages sont identiques et régulièrement répartis car dans ce cas, les forces d'inertie non équilibrées individuellement pour chaque cylindre ont une résultante générale nulle. Toutefois, ces forces n'étant pas dans un même plan, leurs moments résultants par rapport à deux axes parallèles à Ox et Oy ne sont pas forcément nuls.

Cette condition n'est en effet réalisée que si le vilebrequin possède un plan de symétrie perpendiculaire à son axe. Dans le cas contraire, il est aisé de montrer que l'équilibrage peut être obtenu avec un seul contrepoids tournant mais il peut arriver que la place trouvée pour celui-ci par le calcul (pour que le moment résultant soit nul) se situe en dehors du moteur. En utilisant deux contrepoids dont on se fixe a priori l'emplacement mais non la valeur, il est possible d'obtenir un équilibrage complet. Cette solution plus simple que l'équilibrage individuel présente cependant l'inconvénient de provoquer des efforts oscillatoires de la ligne d'arbre et éventuellement une surcharge des paliers du fait que le vilebrequin n'est pas d'une rigidité absolue. Dans la mesure du possible il est donc préférable d'équilibrer séparément chaque attelage.

En ce qui concerne l'équilibrage des forces d'inertie alternatives les choses ne sont pas si simples et doivent être étudiées d'un peu plus près (V. § 2.2). Nous avons vu également que l'expression du moment du couple moteur pour un cylindre pouvait se mettre sous la forme d'une série de Fourier. Pour avoir le moment du couple moteur total nous serons conduit à faire séparément la somme géométrique des termes de même rang compte tenu du décalage des manivelles et de l'ordre d'allumage choisi. Nous obtiendrons ainsi une expression de même forme dont les amplitudes pourront avoir une importance plus ou moins grande selon le décalage des vecteurs correspondants.

2.2. Composition des forces d'inertie alternatives. — À l'exception des moteurs d'avion en étoile et de quelques cas de dispositions en *H* ou en W, il existe deux grandes catégories de moteurs : les moteurs en ligne et les moteurs en V, les moteurs à plat pouvant être considérés comme un cas particulier des moteurs en V.

2.2.1. Moteurs en ligne. — Dans le but d'obtenir la meilleure régularité de couple possible, on s'efforce en pratique de réaliser l'équidistance des cycles relatifs aux différents cylindres, ce qui impose de caler les différents coudes du vilebrequin selon un même angle δ. Pour un moteur à n cylindres nous avons donc :

$$\delta = \frac{4\pi}{n} \quad \text{si le cycle est à quatre temps.}$$

$$\delta = \frac{2\pi}{n} \quad \text{si le cycle est à deux temps.}$$

Considérons l'une des manivelles d'un vilebrequin de moteur à quatre temps prise comme manivelle de référence et faisant un angle θ avec l'axe des cylindres. La manivelle d'un cylindre p fait au même instant, par rapport au même axe, un angle égal à : $\theta + (p - 1)\frac{4\pi}{n}$. Les différentes forces d'inertie d'ordre k sont, d'après l'équation de l'accélération du piston, les projections sur Ox de vecteurs tournant à $k\omega$; de même intensité, en raison de l'égalité des masses en mouvement et de la géométrie de l'embiellage, elles font par rapport à Ox des angles $k\left[\theta + (p - 1)\frac{4\pi}{n}\right]$. Les décalages de ces vecteurs tournants sont donc en progression arithmétique de raison $k\frac{4\pi}{n}$. Deux cas peuvent alors se présenter :

a) $k\frac{4\pi}{n}$ est multiple de 2π, ce qui impose la condition : $k = K\frac{n}{2}$

d'où : $K\frac{n}{2}\left[\theta + (p - 1)\frac{4\pi}{n}\right] = Kn\frac{\theta}{2} + K(p - 1)\,2\pi$

Tous les vecteurs ont même angle polaire et la résultante générale est égale à n fois l'un d'entre eux.

b) $k \neq K\frac{n}{2}$. Les vecteurs forment un polygone fermé à n côtés et n angles égaux, car $nk\frac{4\pi}{n} = 4\,k\pi$ est un multiple entier de 2π. La résultante de ces vecteurs ainsi que la force d'inertie résultante (qui en est la projection sur Ox) sont nulles.

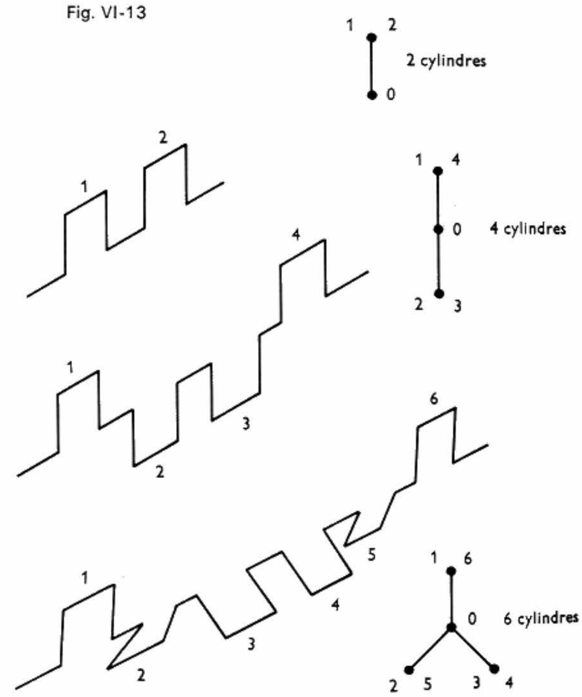
Ces résultats conduisent au théorème suivant : dans un moteur à quatre temps à n cylindres en ligne, les forces d'inertie d'ordre k multiples de $\frac{n}{2}$ ont une résultante égale à n fois la force d'inertie d'ordre k d'un cylindre. Toutes les forces d'ordre k non multiples de $\frac{n}{2}$ ont une résultante nulle.

Par un raisonnement semblable on démontre le théorème suivant relatif au moteur à deux temps : les forces d'inertie d'ordre k multiple de n ont une résultante générale d'ordre k égale à n fois la force d'inertie d'ordre k d'un cylindre. Les forces d'inertie d'ordre k non multiples de n ont une résultante nulle.

Nous avons vu en outre que tous les termes d'ordre impair sont nuls à l'exception du premier.

Les forces d'inertie alternatives n'étant pas dans un même plan, les moments de ces forces par rapport à un axe parallèle à Oy ne seront nuls que si le vilebrequin possède un plan de symétrie perpendiculaire à son axe, ce qui explique la disposition des manivelles sur les vilebrequins courants de moteurs à quatre temps (fig. VI-13).

Fig. VI-13



Dispositions courantes de vilebrequins de moteurs à 4 temps à cylindres en ligne

2.2.2. Moteurs en V (fig. VI-14). — Nous admettrons pour simplifier que les bielles d'un groupe de deux cylindres en V sont articulées côte à côte sur le même maneton et que les organes des deux attelages correspondants sont identiques.

Nous désignerons par Ox et Ox' les axes des cylindres faisant entre eux un angle δ et par OX et OY deux axes rectangulaires dirigés suivant la bissectrice intérieure et la bissectrice extérieure des cylindres.

La force d'inertie d'ordre k du cylindre 1 est dirigée suivant Ox et elle a pour valeur :

$$F_1 = A_k(k\omega)^2 \cos k\theta$$

Pour le cylindre 2 elle est égale à :

$$F_2 = A_k(k\omega)^2 \cos k(\theta - \delta)$$

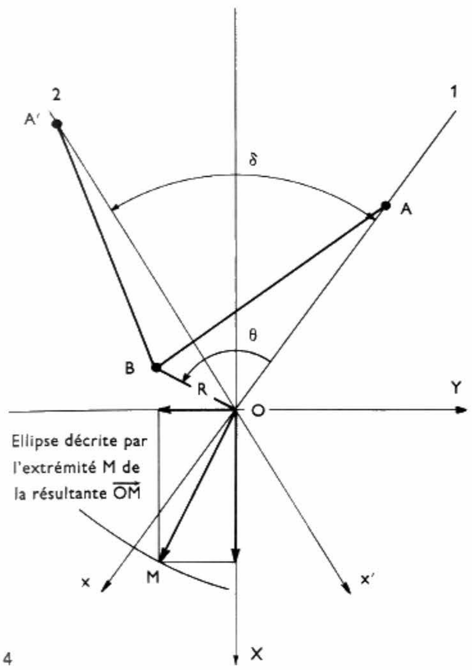


Fig. VI-14

Forces d'inertie dans les moteurs en V (résultante d'ordre k : cas général)

A_k est une constante tenant compte de la masse en mouvement, de la géométrie de l'embiellage et de l'ordre k.

En projetant ces forces suivant OX et OY il vient :

$$X_k = A_k(k\omega)^2 \,[\cos k\theta + \cos k(\theta - \delta)] \cos\frac{\delta}{2}$$

$$Y_k = A_k(k\omega)^2 \,[\cos k\theta - \cos k(\theta - \delta)] \sin\frac{\delta}{2}$$

ou encore en utilisant les relations :

$$\cos a + \cos b = 2\cos\frac{a+b}{2} \cdot \cos\frac{a-b}{2}$$

et : $$\cos a - \cos b = -2\sin\frac{a+b}{2} \cdot \sin\frac{a-b}{2}$$

$$X_k = 2\,A_k(k\omega)^2 \cos k\,\frac{\delta}{2} \cos\frac{\delta}{2} \cos k\left(\theta - \frac{\delta}{2}\right)$$

$$Y_k = -\,2\,A_k(k\omega)^2 \sin k\,\frac{\delta}{2} \sin\frac{\delta}{2} \sin k\left(\theta - \frac{\delta}{2}\right)$$

ce qui montre que X_k et Y_k sont de la forme :

$$X_k = A\cos k\left(\theta - \frac{\delta}{2}\right) \qquad Y_k = B\sin k\left(\theta - \frac{\delta}{2}\right)$$

et que l'extrémité de la résultante décrit une ellipse (lieu des points M) d'axe OX et OY. L'ellipse peut être réduite à un cercle (ce qui permet d'équilibrer totalement la résultante d'ordre k) si, grâce à un contrepoids tournant à $k\omega$, il est possible d'obtenir :

$$|A| = |B| \text{ soit } \cos\frac{k\delta}{2}\cos\frac{\delta}{2} = \pm\sin\frac{k\delta}{2}\sin\frac{\delta}{2}$$

ou encore :

$$k = (2K+1)\frac{\pi}{\delta} \pm 1 \qquad \text{avec } K \text{ entier}$$

L'ellipse peut encore se réduire à un segment de droite porté par OX ou OY suivant que $X_k = 0$ ou $Y_k = 0$

$$X_k = 0 \text{ impose } \cos\frac{k\delta}{2}\cos\frac{\delta}{2} = 0$$

soit : $\delta = \pi$ ou encore : $k = (2K+1)\dfrac{\pi}{\delta}$ (K entier)

Dans ce cas la résultante d'ordre k est dirigée suivant OY et c'est une force de tamis.

$$Y_k = 0 \text{ nécessite que } \sin k\frac{\delta}{2}\sin\frac{\delta}{2} = 0$$

soit : $\delta = 0$ ou encore $k = 2K\dfrac{\pi}{\delta}$ (K entier)

La résultante est dirigée suivant OX, c'est une force de pilon.

Les résultantes des forces d'inertie alternatives ne sont pas dans un même plan pour un moteur à plusieurs rangées de cylindres et les moments de ces forces, par rapport à des axes parallèles à OX et OY, ne pourront être nuls que si le vilebrequin possède un plan de symétrie.

3. VIBRATIONS DE TORSION DANS LE VILEBREQUIN

Le vilebrequin constitue un système susceptible de vibrer naturellement en torsion du fait de son élasticité et des masses des organes qui lui sont liés directement ou indirectement. Comme le couple moteur est une grandeur périodique dont les irrégularités au cours d'un cycle sont représentées par une série de Fourier (V. § 1.6), la coïncidence de l'un des harmoniques excitateurs avec l'une des fréquences naturelles du vilebrequin peut provoquer des résonances. Les torsions alternées de chacun des éléments de la ligne d'arbre qui en résultent peuvent alors atteindre des valeurs suffisamment élevées pour que les contraintes correspondantes entraînent la rupture en fatigue du vilebrequin. En dehors même du danger de résonance qui se produit pour les vitesses critiques, ces vibrations sont de toute façon nuisibles et provoquent en particulier des chocs dans les accouplements ainsi que dans les engrenages où les jeux changent de sens à chaque oscillation. Il est généralement possible de prendre des mesures appropriées, en cours d'établissement d'un projet de moteur, pour limiter ces effets en se basant sur une théorie simplifiée qui rend cependant compte des phénomènes avec une assez bonne approximation.

3.1. Calcul des fréquences propres d'oscillations du vilebrequin. — Considérons (fig. VI-15a) un arbre comportant à une extrémité un volant de masse m_1, de moment d'inertie polaire massique I_0 et encastré à l'autre extrémité. Soit L la longueur de l'arbre et appelons

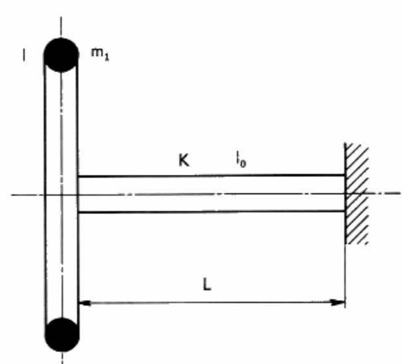


Fig. VI-15 a

Système à un volant

rigidité de cet arbre la valeur K du couple appliqué qui produirait entre ses deux extrémités une rotation de 1 radian :

$$K = \frac{G \cdot I_0}{L}$$

(G est le module d'élasticité au glissement du métal)

Un couple T appliqué à l'extrémité libre fait tourner cette dernière d'un angle α tel que $T = K\alpha$. Si l'arbre est ensuite abandonné à lui-même, l'équation d'équilibre dynamique du système s'écrit (en l'absence d'amortissement) :

$$I_0\,\frac{d^2\alpha}{dt^2} + K\alpha = 0$$

Cette équation a une solution :

$$\alpha = \alpha_0 \cos\left(\sqrt{\frac{K}{I_0}}\;t + \varphi\right)$$

qui définit un mouvement oscillatoire non amorti de fréquence :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{I_0}}$$

f est la fréquence propre d'oscillation du système considéré.

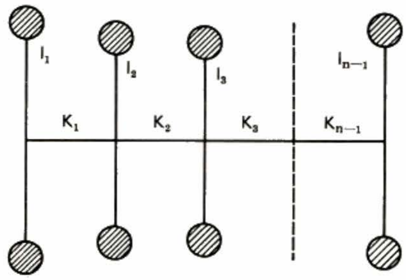


Fig. VI-15 b

Système à volants multiples

En pratique le schéma est généralement plus compliqué (fig. VI-15 b) et il faut résoudre un système d'équations tel que :

$$I_1 \frac{d^2\alpha}{dt^2} + K_1(\alpha_1 - \alpha_2) = 0$$

$$I_2 \frac{d^2\alpha}{dt^2} - K_1(\alpha_1 - \alpha_2) + K_2(\alpha_2 - \alpha_3) = 0$$

$$I_3 \frac{d^2\alpha}{dt^2} - K_2(\alpha_2 - \alpha_3) + K_3(\alpha_3 - \alpha_4) = 0$$

. . . .

$$I_n \frac{d^2\alpha}{dt^2} - K_{n-1}(\alpha_{n-1} - \alpha_n) = 0$$

où α_1, α_2, α_3, . . . sont les déplacements angulaires à l'instant t des masses m_1, m_2, m_3, ... d'inertie polaire I_1, I_2, I_3, ... par rapport à leur position d'équilibre.

On démontre que ce système d'équations a pour solutions :

$$- I_1\omega^2\lambda_1 + K_1(\lambda_1 - \lambda_2) = 0$$
$$- I_2\omega^2\lambda_2 - K_1(\lambda_1 - \lambda_2) + K_2(\lambda_2 - \lambda_3) = 0$$
$$- I_3\omega^2\lambda_3 - K_2(\lambda_2 - \lambda_3) + K_3(\lambda_3 - \lambda_4) = 0$$

. . . .

$$- I_n\omega^2\lambda_n - K_{n-1}(\lambda_{n-1} - \lambda_n) = 0$$

λ_1, λ_2, etc. sont définis par les relations $\alpha_1 = \lambda_1 \sin \omega t$, $\alpha_2 = \lambda_2 \sin \omega t$, etc. et représentent les amplitudes successives d'oscillation, ou déformées, de chaque masse.

Le procédé le plus simple pour résoudre ce système consiste à déterminer par approximations successives les valeurs de ω qui le satisfont. Pour cela on écrit le système sous la forme :

$$\lambda_2 = \lambda_1 - \frac{I_1\,\lambda_1}{K_1}\,\omega^2$$

$$\lambda_3 = \lambda_2 - \frac{I_1\lambda_1 + I_2\lambda_2}{K_2}\,\omega^2$$

$$I_1\lambda_1 + I_2\lambda_2 + I_3\lambda_3 + \ldots = 0$$

On attribue à λ_1 une valeur arbitraire fixe, 1 par exemple, puis on se donne une valeur de ω qui permet de calculer successivement λ_2, λ_3, etc. Si $\omega = 2\pi f$ est une pulsation naturelle, la dernière équation est satisfaite. Sinon on reprend le calcul avec une autre valeur de ω.

Pour un système à n volants on obtient ainsi $(n - 1)$ fréquences propres. La valeur la plus basse correspond évidemment à la fréquence propre fondamentale et au premier mode de vibration. Une valeur approchée de la fréquence propre fondamentale d'un vilebrequin peut être obtenue par la formule B.I.C.E.R.A. :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K}{I}} \cdot \sqrt{\frac{A + B}{A . B}}$$

dans cette expression K, I, B, A ont la signification suivante :

K : rigidité d un coude (V. § 3.2) ;

I : moment d'inertie polaire par cylindre ;

$B = \frac{I_v}{I}$: rapport du moment d'inertie polaire massique du volant moteur I_v et du moment d'inertie polaire par cylindre I.

La valeur de A dépend du nombre de cylindres n du moteur.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1	3	6	10	15	21	28	36	45	55	66	78

À titre d'exemple, la figure VI-16 fournit les fréquences naturelles, et les diagrammes des déformées relatives calculées, correspondant au mouvement libre d'un vilebrequin de moteur à quatre cylindres équipé de son volant.

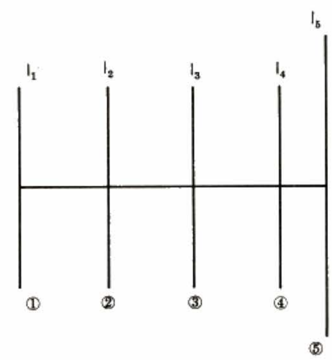


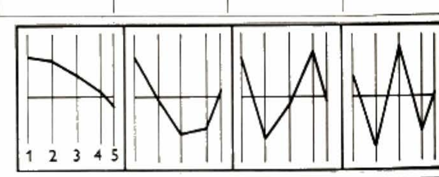
Fig. VI-16

Fréquences propres et déformées relatives d'un vilebrequin de moteur à quatre cylindre en ligne

$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 33{,}1 . 10^{-4}$ kg . m²

$I_V = 276{,}5 . 10^{-4}$ kg . m²

$K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = 78{,}5 . 10^3$ Nm/rad

Fréquence f (hertz)	1er mode 321	2e mode 793	3e mode 1 196	4e mode 1 461
λ_1	1	1	1	1
λ_2	0,84	— 0,04	— 1,18	— 2,43
λ_3	0,52	— 1,04	— 0,24	2,78
λ_4	0,11	— 0,95	1,28	— 1,97
λ_5	— 0,30	0,13	— 0,04	0,08
Déformées relatives				

3.2. Constantes physiques du vilebrequin

3.2.1. Détermination de la constante de torsion. — Dans les calculs d'avant-projet les rigidités K qui figurent dans les expressions des fréquences naturelles doivent être déterminées par le calcul. On obtient des valeurs approximatives en remplaçant le vilebrequin par un arbre fictif de même rigidité résultante que l'arbre réel mais de rigidité constante par unité de longueur. La longueur L, appelée longueur réduite ou équivalente, se détermine par la condition d'égalité des déformations torsionnelles, pour un même couple, de l'arbre équivalent et de l'arbre réel.

De nombreuses formules empiriques sont proposées pour le calcul de la longueur réduite l d'un coude de vilebrequin. La formule suivante est due à Carter (fig. VI-17) :

$$l = (c + 0{,}8\,h) + \frac{3}{4}\,a\,\frac{I_0}{I_m} + \frac{3}{2}\,R\,\frac{d_0^4 - d_1^4}{h\,b^3}$$

I_0 désigne le moment d'inertie polaire de la section du tourillon par rapport à son centre.

I_m est le moment d'inertie polaire de la section du maneton par rapport à son centre. Le diamètre de l'arbre fictif doit avoir la même valeur d_0 que celle des tourillons du vilebrequin. Si l'arbre comporte des parties cylindriques de

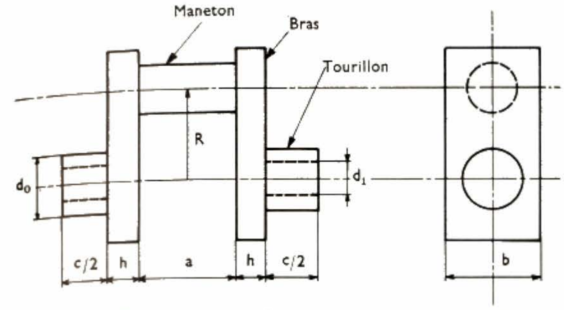


Fig. VI-17 — Représentation schématique d'un coude de vilebrequin

diamètre différent de celui des tourillons, leurs longueurs réduites sont déterminées par la relation :

$$l = l_1 \frac{I_0}{I_1}$$

l_1 et I_1 sont respectivement la longueur et le moment d'inertie polaire de la partie à réduire.

La longueur réduite du vilebrequin entier s'obtient en effectuant la somme des longueurs réduites des différents éléments, soit :

$$L = \Sigma l$$

La rigidité en torsion de l'ensemble est finalement donnée par l'expression :

$$K = \frac{G\, I_0}{L}$$

3.2.2. Calcul des moments d'inertie polaire massiques. — Le moment d'inertie polaire des masses en rotation résulte de la somme des moments d'inertie des différentes parties constitutives de l'arbre (bras, maneton, tourillon, contrepoids) et des masses liées au vilebrequin. Parmi ces dernières il faut compter les accessoires et leurs organes d'entraînement, la partie de bielle en rotation et 50 % des masses en mouvement alternatif.

Le calcul des moments d'inertie polaires des corps cylindriques n'offre aucune difficulté (V. t. 1 Mécanique des solides, chap. 4).

En ce qui concerne la détermination du moment d'inertie polaire des bras il est généralement commode d'utiliser la méthode suivante due à Wilson (fig. VI-18) et qui consiste à découper le bras en tranches circulaires successives d'épaisseur *dr*, de rayon *r* et de largeur *e*. Si ρ est la masse volumique du matériau, chaque moment d'inertie élémentaire a pour valeur :

$$dI = \rho \frac{2\pi}{360} \beta\, e\, r^2\, dr$$

Le moment d'inertie polaire du bras sera obtenu en formant la somme des moments élémentaires soit :

$$I = \rho \frac{2\pi}{360} \Sigma\, (\beta\, e r^2)\, dr$$

Pour les masses en rotation autour d'axes différents de celui du vilebrequin et tournant à des vitesses différentes, il faut calculer leur moment d'inertie polaire ramené au vilebrequin par la formule :

$$I = I_p \left(\frac{N_1}{N}\right)^2$$

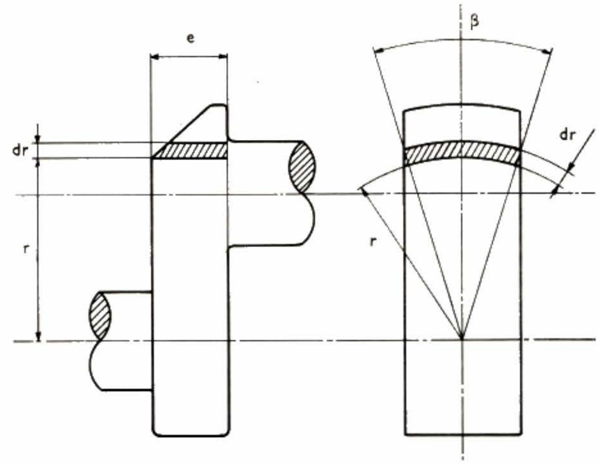


Fig. VI-18 — Calcul du moment d'inertie d'un bras de vilebrequin

avec :
I : moment d'inertie ramené au vilebrequin ;
I_p : moment d'inertie propre de la masse considérée ;
N_1 : fréquence de rotation de la masse considérée ;
N : fréquence de rotation du vilebrequin.

3.3. Détermination des vitesses critiques. — Nous avons vu que pour un cylindre, les irrégularités du couple moteur sont représentées par une série de termes de la forme générale suivante :

$$|C_k| \sin\, (k\, \omega t + \varphi_k)$$

avec :
$k = 0{,}5 ; 1 ; 1{,}5 ; 2, \ldots$ pour un moteur à quatre temps ;
$k = 1 ; 2 ; 3 ; 4, \ldots$ pour un moteur à deux temps.

Le couple harmonique provenant d'un cylindre quelconque d'un polycylindre se déduit immédiatement de la connaissance de l'angle de déphasage dont la valeur dépend : de l'angle de calage de la manivelle par rapport à la manivelle du cylindre 1 pris comme origine, de l'ordre d'allumage choisi et de l'ordre harmonique du terme considéré.

En considérant, par exemple, un moteur six cylindres en ligne à quatre temps, le décalage d'allumage est égal à $\frac{720}{6} = 120°$; entre les différents cylindres les écarts de phase suivant l'ordre d'allumage sont égaux à 120 *k*. Ainsi l'écart de phase est égal à 60° pour l'harmonique 0,5, à 120° pour l'harmonique 1, à 180° pour l'harmonique 1,5 et ainsi de suite. Lorsque sa valeur dépasse 360° on retranche 360°. Cela permet d'établir les diagrammes de phase en fonction de l'ordre d'allumage choisi (fig. VI-19). Sous l'impulsion de ces différents couples harmoniques, les régimes oscillatoires possibles correspondant aux fréquences naturelles du vilebrequin apparaissent en fonction de la fréquence de rotation du moteur.

D'une façon générale les fréquences de rotation critiques N_c sont données par la relation suivante :

$$N_c(\text{tours par minute}) = 60\, \frac{f}{k}$$

avec
f : fréquence naturelle de la ligne d'arbre ;
k : ordre du couple harmonique excitateur.

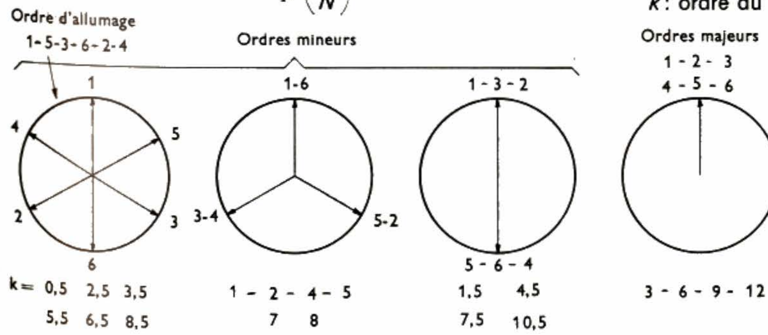


Fig. VI-19

Diagramme de phase des couples harmoniques (moteur six cylindes)

En pratique on est conduit à considérer principalement les vitesses critiques correspondant à la fréquence naturelle fondamentale et aux couples harmoniques relatifs aux ordres majeurs mais il peut arriver que des couples harmoniques d'ordres mineurs entraînent des effets importants du fait que les amplitudes de la déformée augmentent au fur et à mesure que l'on s'éloigne du nœud d'oscillation. Dans ce cas, il peut être intéressant de modifier l'ordre d'allumage si c'est possible.

3.4. Solutions employées pour combattre les vibrations de torsion. — Si les vitesses critiques se trouvent dans la zone d'utilisation du moteur et si les vibrations qui en résultent sont susceptibles, par leurs effets, d'entraîner des incidents mécaniques graves il est indispensable de remédier à cette situation soit en déplaçant les régimes de résonance en dehors de la zone d'utilisation, soit en employant des amortisseurs.

La première de ces solutions conduit à modifier l'inertie des masses en mouvement ou la rigidité de l'arbre de façon à changer les valeurs des fréquences naturelles. La seconde solution consiste à disposer à l'extrémité libre du vilebrequin un amortisseur de vibration dont l'action est de réduire les écarts d'amplitude par dissipation d'énergie. Cet organe se compose généralement d'une couronne et d'un moyeu reliés l'un à l'autre par frottement. En raison de son inertie la couronne tend à conserver un mouvement de rotation uniforme alors que le moyeu suit les oscillations du vilebrequin. Le mouvement relatif absorbe un travail de friction qui se traduit par un dégagement de chaleur et s'oppose à de fortes amplitudes du moyeu.

Ces appareils peuvent être divisés en deux catégories: ceux comportant un rappel élastique entre le volant d'inertie et la partie liée rigidement au vilebrequin et ceux qui sont dénués de rappel élastique (fig. VI-20 a et b). Les appareils du premier type sont appelés résonateurs; les autres portent le nom de Damper. Il est important de noter qu'ils ne permettent pas d'annuler les vibrations puisque leur action ne peut se faire sentir que lorsque les amplitudes sont déjà notables.

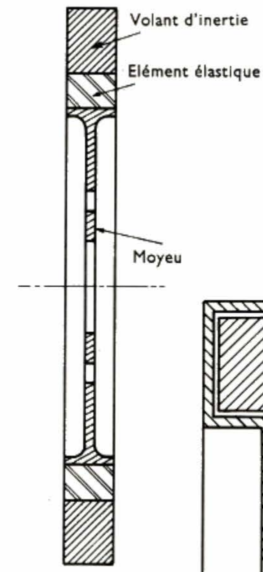


Fig. VI-20 a

Schéma de principe d'un résonateur

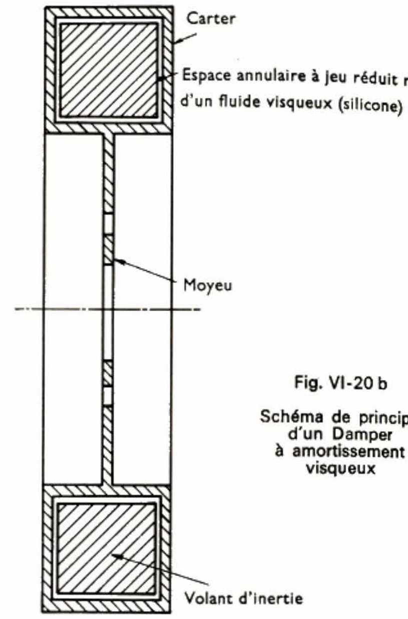


Fig. VI-20 b

Schéma de principe d'un Damper à amortissement visqueux

4. LA DISTRIBUTION

La distribution a pour fonction la mise en communication périodique du cylindre avec les conduits d'admission et d'échappement à des moments précis du cycle quel que soit le régime de rotation du moteur.

Parmi les divers types de distributions utilisées sur les moteurs à quatre temps, nous pouvons distinguer: la distribution par fourreaux à mouvement longitudinal ou louvoyant, la distribution par boisseau rotatif, et la distribution par soupapes qui est employée dans la majorité des cas. En ce qui concerne les moteurs à deux temps la distribution se fait généralement par des lumières fixes usinées dans le cylindre (balayage transversal) ou par l'intermédiaire de lumières fixes et de soupapes (balayage équicourant). Certains types de moteurs à deux temps récents sont équipés en plus de distributeurs rotatifs qui ont permis d'augmenter notablement leurs performances.

Nous nous limiterons dans ce chapitre à l'étude de la distribution par soupapes. Trois types principaux de commande des soupapes sont utilisés à savoir:

— la commande par arbre à cames latéral, tige de culbuteur et culbuteur;

— la commande par arbre à cames en tête à attaque directe ou indirecte;

— la commande desmodromique (commande sans ressort de rappel) dont les applications sont très peu fréquentes en raison de leur prix de revient.

Ces différentes dispositions sont décrites dans l'étude technologique du moteur (V. chap. 7, § 3.1).

4.1. Étude du mouvement théorique de la soupape. Nous savons que la puissance développée par un moteur est directement proportionnelle au débit d'air transvasé. Par conséquent, pour une cylindrée déterminée il faut donc prévoir des orifices d'admission et d'échappement de sections suffisantes de façon que les pertes de charge y soient aussi faibles que possible.

Or, nous avons vu au cours de l'étude du transvasement (V. chap. 2, § 4) que la section débitante est proportionnelle à trois grandeurs qui sont: le diamètre, la levée et le coefficient de débit de la soupape. Abstraction faite du coefficient de débit qui a été traité par ailleurs, le problème est par conséquent de prévoir des soupapes de grand diamètre et une loi de mouvement telle que la section moyenne dans l'intervalle d'ouverture soit aussi grande que possible.

D'après le cycle théorique à quatre temps, l'intervalle d'ouverture pour l'admission et l'échappement correspond à une rotation de 180° du vilebrequin; mais, compte tenu de l'impossibilité d'obtenir, pour des raisons mécaniques, un déplacement instantané des soupapes, on est conduit à donner de l'avance à l'ouverture et du retard à la fermeture. C'est ainsi que du fait du retard à la fermeture de la soupape d'échappement et de l'avance à l'ouverture de la soupape d'admission, on obtient une phase de croisement. Dans le cas des moteurs à allumage commandé de voiture particulière, la durée angulaire du croisement est limitée par les conditions de fonctionnement au ralenti et aux charges partielles. Quant aux angles d'ouverture de l'échappement et de fermeture de l'admission, ils sont généralement imposés par la gamme de régime du moteur et la forme de la courbe de couple requise. Ces considérations fixent d'ailleurs une durée angulaire totale d'ouverture voisine de 260° pour ce type de moteur. Cette valeur est portée jusqu'à 315° sur les moteurs de compétition. Pour les moteurs Diesel rapides l'angle de croisement est généralement très réduit, car le jeu minimal entre piston et culasses est très faible (0,008 à 0,010 mm), ce qui limite la levée des soupapes d'admission et d'échappement de part et d'autre du P.M.H. du piston. De plus, les conditions d'un bon départ à froid imposent que la fermeture de la soupape d'admission ait lieu au plus tard 40° après le P.M.B. Pour ces raisons l'angle d'ouverture totale des soupapes est généralement voisin de 230°.

Les diamètres de soupapes et les durées d'ouverture étant fixés, le problème revient à obtenir l'intégrale sec-

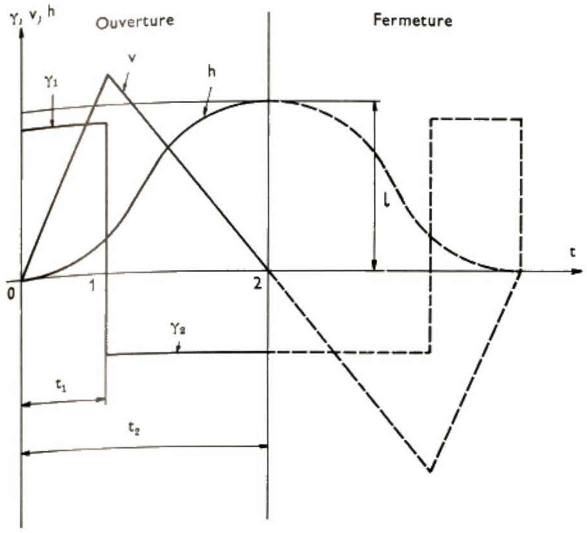


Fig. VI-21 — Exemple de diagramme de mouvement de soupape

tion-temps maximale compatible avec les limitations d'ordre mécanique. De ce point de vue il est courant de choisir une levée totale de soupape égale à 25 % de son diamètre ; au-delà de cette valeur on s'aperçoit que le gain sur la section de passage est négligeable.

Considérons maintenant (fig. VI-21) un diagramme de mouvement de soupape à profil symétrique et à accélération constante, défini par une levée totale l et un demi-angle d'ouverture :

$$\theta_2 = \frac{t_2}{\omega}$$

($\omega = 6N$ si nous exprimons N en tours par minute et θ_2 en degrés).

Soit :

h : la levée instantanée ;
v : la vitesse de la soupape ;
γ : l'accélération de celle-ci.

La loi de mouvement de la soupape nécessite :

1° que la vitesse v s'annule à la levée maximale l, ce qui impose que l'aire totale sous-tendue à l'accélération soit égale à zéro ;

2° que l'aire sous-tendue à la vitesse soit égale à la levée totale l.

La première condition entraîne : $\gamma_1 . t_1 = \gamma_2 . (t_2 - t_1)$

La seconde condition est satisfaite si : $\frac{v_1 \; t_2}{2} = l$

Or : $v_1 = \gamma_1 . t_1$ et : $l = \frac{\gamma_1}{2} . t_2 . t_1$

D'où : $\gamma_1 = \frac{2l}{t_2 . t_1}$ et : $\gamma_2 = \frac{2l}{t_2 . (t_2 - t_1)}$

ou encore en posant : $\nu = \frac{t_1}{t_2}$

$$\gamma_1 = \frac{2l}{\nu t_2^2} \quad \text{et :} \quad \gamma_2 = \frac{2l}{(1 - \nu) t_2^2}$$

Ces deux relations ne sont pas suffisantes pour définir la loi de mouvement de soupape car la valeur de ν n'est pas connue *a priori*. En fait, on se fixe la valeur de l'intégrale section-temps ou mieux encore de l'efficacité du diagramme de levée définie par le rapport :

$$e = \frac{\int_0^{t_2} h . dt}{l . t_2}$$

qui permet de la déterminer complètement bien que le choix de l'efficacité ne soit pas arbitraire comme nous le verrons par la suite. On démontre que e est donnée par l'expression remarquablement simple suivante : $e = \frac{2 - \nu}{3}$.

Il ressort de ces résultats qu'étant donné la levée maximale l et le temps t_2 (ou l'angle θ_2) imparti à cette levée, les trois paramètres fondamentaux du mouvement sont :

— l'accélération maximale positive : γ_1
— l'accélération maximale négative : γ_2
— l'efficacité : e

L'examen des relations qui précèdent fait apparaître les conclusions suivantes :

— L'efficacité ne dépend que de la position du point d'inflexion de la levée h et est d'autant plus grande que celui-ci se place plus près du point d'attaque. L'efficacité maximale que l'on peut obtenir avec cette loi de mouvement (pour $\nu = 0$) est $e = \frac{3}{2} \approx 0{,}67$; cette valeur est inaccessible en pratique car elle correspond à une accélération positive infinie incompatible avec la tenue mécanique des organes de la distribution.

— À levée et à angle d'ouverture donnés, l'efficacité est d'autant plus grande que l'accélération γ_1 positive est plus grande et donc que γ_2 est plus faible. Pour fixer les idées avec $\gamma_1 = 11 . 10^3$ m/s², ce qui est généralement acceptable sur une distribution par arbre à cames en tête, $\nu = 0{,}173$ et $e = 0{,}61$. Dans le cas d'une distribution par arbre à cames latéral $\gamma_1 = 2{,}8 . 10^3$ m/s² ; $\nu = 0{,}35$ et $e = 0{,}55$. De ces considérations il ressort que l'efficacité varie assez peu en fonction de l'accélération à partir d'une certaine valeur. En réalité il s'agit d'une efficacité moyenne et si nous considérons la vivacité (efficacité instantanée) à l'ouverture, celle-ci varie beaucoup plus vite avec l'accélération positive que ne le fait l'efficacité moyenne. Or, du point de vue aérodynamique, la vivacité à l'ouverture joue un rôle fondamental, en particulier pour le passage de la bouffée d'échappement ; c'est sans doute le principal avantage que présentent, à un premier stade, les distributions par arbre à cames en tête et ensuite les commandes desmodromiques car elles autorisent des accélérations positives de plus en plus grandes.

La loi d'accélération constante qui a été considérée n'est pas la seule usitée. On utilise également différentes courbes à accélérations progressives définies par des fonctions mathématiques. Parmi celles-ci citons :

— les courbes d'accélération paraboliques ;
— les courbes d'accélération sinusoïdales ;
— les courbes d'accélération trapézoïdales.

D'autres formes sont basées sur l'utilisation de polynômes qui donnent non seulement une loi d'accélération progressive mais de plus continue. Un des avantages découlant de l'utilisation de la méthode polynomiale est qu'elle peut être adaptée au mouvement réel de la soupape. Cette méthode appelée méthode « polydyne » est d'un usage très fréquent aux États-Unis d'Amérique.

4.2. Étude de la came. — Le mouvement de la soupape est obtenu par l'action simultanée de la came et du ressort de rappel bien que le rôle du ressort soit essentiellement de maintenir le contact entre les différents organes de la distribution (y compris le contact avec la came) pendant la phase d'accélération négative.

Le profil de la came se déduit donc de la loi de mouvement de la soupape et du type de commande choisi. Considérons pour la commodité de l'exposé le schéma d'une distribution par arbre à cames latéral et poussoir (V. fig. VI-22 a et b), cas très fréquent en pratique.

Désignons par :

R_B : le rayon de base (ou de noyau) de la came ;

h_C : la levée côté came pour un angle de rotation de la came θ_C ;

ρ_C : le rayon de courbure de la came en un point quelconque ;

ε : l'excentricité de la ligne d'impact poussoir-came ;

R_G : le rayon de courbure du poussoir ;

$\frac{l_1}{l_2}$: le rapport des bras de levier du culbuteur (ce rapport est supposé constant) ;

N_C : la fréquence de rotation de l'arbre à cames.

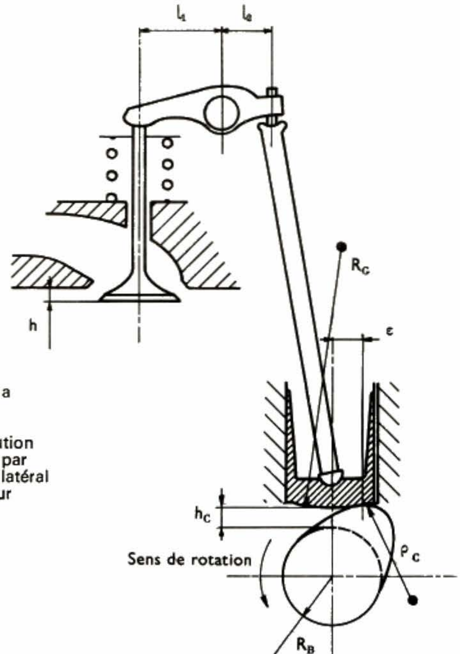


Fig. VI-22 a

Schéma d'une distribution de soupape par arbre à cames latéral et culbuteur

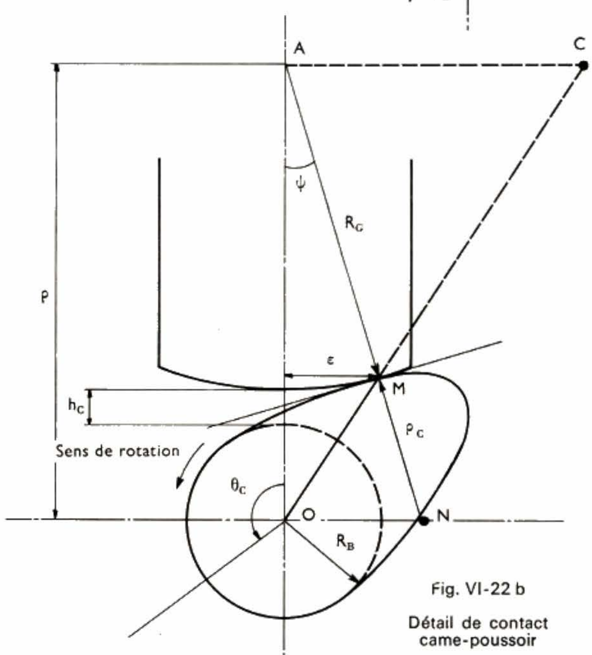


Fig. VI-22 b

Détail de contact came-poussoir

Connaissant la loi de mouvement de la soupape, nous nous proposons de calculer :

— le rayon de courbure instantané de la came ;
— le rayon de base ;
— l'excentricité de la ligne d'impact poussoir-came.

Soit M le point de contact instantané came-poussoir.

La distance ρ entre l'axe de la came O et le centre A du rayon de courbure du poussoir est donnée par la relation :

$$\rho = R_B + h_C + R_G = f(\theta_C)$$

Quant au rayon de courbure de la came il a pour expression :

$$\rho_C = \frac{(\rho^2 + \rho'^2)^{\frac{3}{2}}}{\rho^2 + 2\rho'^2 - \rho\rho''} - R_G$$

avec : $$\rho' = \frac{d\rho}{d\theta} = \frac{dh_C}{d\theta} = h'_C$$

et : $$\rho'' = \frac{d}{d\theta}\left(\frac{d\rho}{d\theta}\right) = \frac{d^2h_C}{d\theta^2} = h''_C$$

D'où : $$\rho_C = \frac{(\rho^2 + h'^2_C)^{\frac{3}{2}}}{\rho^2 + 2h'^2_C - \rho h''_C} - R_G$$

Entre les grandeurs h'_C et h''_C, que l'on appelle respectivement facteur vitesse et facteur accélération de la came, et la vitesse et l'accélération de la soupape nous pouvons écrire les relations suivantes :

$$h'_C = \frac{30}{\pi N_C} \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot v \quad \text{et : } h''_C = \left(\frac{30}{\pi N_C}\right)^2 \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot \gamma$$

Remarquons que le dénominateur de l'équation du rayon de courbure peut devenir nul ou même négatif pendant la période d'accélération positive. Dans ce cas, le rayon de courbure est négatif et la came présente un flanc creux dont l'usinage peut être irréalisable si le rayon de la meule de rectification est supérieur au rayon de courbure au point considéré.

En négligeant $\frac{2h'^2_C}{\rho^2}$ devant l'unité nous devons donc vérifier l'inéquation suivante :

$$h''_C \leqslant R_G + R_B \quad \text{quand } h''_C > 0$$

Une bonne tenue mécanique nécessite que le rayon de courbure au sommet de la came soit au moins égal ou supérieur à une valeur r dépendant surtout des pressions de Hertz (V. chap. 7 § 3.1) compatibles avec les caractéristiques mécaniques des matériaux en contact. Or, au sommet de came : $h_C = h_m$ (levée maximale) ; $h'_C = 0$ et $h''_C = h''_m$ (facteur accélération négative $= -|h''_m|$)

d'où : $$\rho_C = \frac{\rho}{1 + \left|\frac{h''_m}{\rho}\right|} - R_G \geqslant r$$

Comme : $$\rho = R_B + h_C + R_G$$

nous déduisons la valeur du rayon de base de la came :

$$R_B \geqslant \frac{1}{2}\left[R_G\left(\sqrt{1 + \frac{4\,|h''_m|}{R_G + r}} - 1\right) + r\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\,|h''_m|}{R_G + r}}\right)\right] - h_C$$

Dans le cas particulier du poussoir plan ($R_G \to \infty$) le rayon ρ tend vers l'infini et en négligeant $\frac{\rho'^2}{\rho^2}$, infiniment petit du second ordre, il vient :

$$\rho_C = \rho - R_G + \rho''$$

ou encore : $$\rho_C = R_B + h_C + h''_C$$

Si, comme précédemment, nous imposons un rayon de courbure minimal r au sommet de came, le rayon de base doit vérifier la relation : $R_B \geqslant r + h''_m - h_C$

4.2.1. Calcul de l'excentricité *e* du point de contact came-poussoir. — Désignons par C le centre instantané de rotation relatif au mouvement du rayon R_G du poussoir pour l'angle θ_C considéré, par ψ l'angle de R_G par rapport à $\overline{OA}$ et par ω_C la vitesse de rotation de la came (V. fig. VI-22 b). Le point C se trouve à l'intersection des perpendiculaires à la vitesse $\omega_C\,\overline{OM}$, d'une part, et à la vitesse du poussoir $\omega_C h'_C$, d'autre part. Par ailleurs, les vitesses $\omega_C h'_C$ et $\omega_C\,\overline{OM}$ sont à l'instant considéré proportionnelles aux rayons $\overline{CA}$ et $\overline{CM}$ en sorte que :

$$h'_C = \overline{OM}\,\frac{\overline{CA}}{\overline{CM}}$$

Comme : $\frac{\overline{CA}}{\overline{CM}} = \frac{\overline{ON}}{\overline{OM}}$ nous déduisons : $h'_C = \overline{ON}$

$\overline{ON}$ représente donc le facteur vitesse du poussoir. L'excentricité ε est égale à : $\varepsilon = R_G \sin\psi = R_G \cdot \frac{\operatorname{tg}\psi}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\psi}}$

donc : $$\varepsilon = R_G\,\frac{h'_C}{\sqrt{(R_B + R_G + h_C)^2 + h'^2_C}}$$

et : $$\operatorname{tg}\psi = \frac{\overline{ON}}{\overline{OA}} = \frac{h'_C}{R_B + R_G + h_C}$$

On démontre que l'excentricité ε est maximale lorsque :

$$h''_C = \frac{h'_C{}^2}{R_G + R_B + h_C}$$

et que cette condition ne peut être réalisée qu'au voisinage de la vitesse maximale du poussoir. Dans le cas particulier du poussoir plan : $\varepsilon = \overline{ON} = h'_C$.

4.2.2. Rampes d'attaque et de fermeture. — La nécessité de maintenir un jeu convenable entre la soupape et la commande de distribution (pour que la soupape repose correctement sur son siège à levée nulle) conduit à ajouter au profil de came des rampes d'attaque et de fermeture. Aussi limite-t-on à une valeur acceptable les vitesses d'impact et par suite évite-t-on les chocs violents (d'où l'appellation fréquente de « rampes de silence »).

Ces rampes s'étendent sur plusieurs dizaines de degrés de rotation ; elles sont généralement décrites à vitesse constante comprise entre 0,10 et 0,30 m/s.

4.3. Ressorts de soupape. — Les tensions de ressort, théoriquement nécessaires pour maintenir en contact les éléments de la distribution pendant la période d'accélération négative de la soupape, sont obtenues en multipliant la masse équivalente en mouvement, ramenée côté soupape, par la valeur de l'accélération négative. La masse équivalente est déterminée par le calcul ou par pesée de chaque élément et par le calcul du moment d'inertie polaire du culbuteur s'il ne s'agit pas d'une distribution par arbre à cames en tête à attaque directe.

La masse totale équivalente M se compose des masses élémentaires suivantes :

— *Côté soupape :*

m_S: soupape $+ \frac{1}{3}$ (du ou des) ressorts + coupelles de ressort et dés de soupape + moment d'inertie polaire du culbuteur divisé par le carré de la distance de son axe de rotation à l'axe de la soupape.

— *Côté came :*

m_C: poussoir + tige de culbuteur.

Connaissant m_S, m_C et $\frac{l_1}{l_2}$ (rapport des bras de levier du culbuteur), nous pouvons écrire :

$$M = m_S + \left(\frac{l_2}{l_1}\right) . m_C$$

Pour une levée de soupape h, la tension exercée par le ressort est égale à : $F = Kh + F_0$; K est la rigidité du ressort et F_0 la tension initiale.

En pratique, pour des raisons de sécurité et aussi pour tenir compte des frottements, on définit la tension du ressort de façon à maintenir un écart de 10 à 20 % avec la force d'inertie, au régime maximal du moteur ; ainsi, dans le cas extrême, la levée totale l est telle que : $Kl + F_0 = 1{,}2 . M\,|\gamma|$ (γ : accélération négative maximale de la soupape). Dans le cas des moteurs rapides la rigidité K est déterminée par les dimensions du ressort et par sa fréquence naturelle dont la valeur doit être de onze à douze fois plus grande que le régime de rotation maximal de l'arbre à cames.

La fréquence propre d'un ressort de masse m et de rigidité K est donnée par la formule :

$$f = \frac{1}{2\pi} . \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Comme le tiers de la masse m intervient dans la valeur de M le calcul du ressort doit se faire par itération.

Si l'on doit disposer deux ressorts en parallèle, la fréquence propre est donnée par la relation :

$$f = \frac{1}{2\pi} . \sqrt{\frac{K_1 + K_2}{m_1 + m_2}}$$

4.4. Fréquence naturelle de la commande de soupape. — Au cours de l'étude qui précède, nous avons implicitement supposé la rigidité de la commande de soupape infinie, ce qui a conduit à écrire que le mouvement imposé au poussoir par la came est exactement reporté à la soupape. En considérant les efforts exercés dans une commande de soupape et le dimensionnement des pièces utilisées pour transmettre ces efforts, et compte tenu du fait que ces pièces doivent être aussi légères que possible, nous concevons que cette hypothèse n'est pas valable. Une analyse complète de la distribution montre que ce système est équivalent à un ensemble de masses disposées en série et réunies entre elles par des ressorts dont l'élasticité correspond à chaque pièce. Un tel système peut avoir un grand nombre de fréquences naturelles, mais en pratique c'est la fréquence la plus basse qui intervient dans les difficultés que présente le fonctionnement des commandes de soupapes. La fréquence fondamentale peut être obtenue approximativement en assimilant la distribution à un système équivalent de masse M somme de la demi-masse de la tige de culbuteur, des masses du culbuteur, de la soupape, de la coupelle et d'un tiers du ressort, agissant sur un ressort fictif de rigidité égale à la rigidité de la distribution (fig. VI-23).

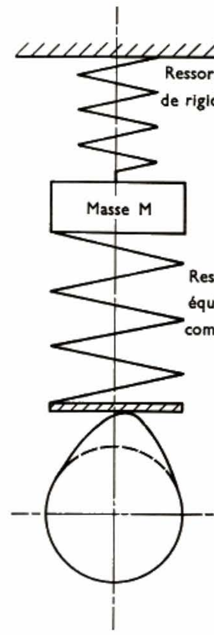


Fig. VI-23

Schéma équivalent de la commande de soupape

Au cours de l'établissement d'un projet, le calcul de la rigidité de la distribution est impossible mais sa valeur peut être approximativement fixée compte tenu de valeurs déjà obtenues sur des projets similaires et mesurées par essais. Les valeurs courantes de rigidité obtenues sur des moteurs culbutés sont comprises entre 350 et 540 kg/mm. Quand la masse équivalente M_1 et la rigidité de la distribution K_1 sont connues la fréquence propre fondamentale est donnée par la formule : $f = \frac{1}{2\pi} . \sqrt{\frac{K_1}{M_1}}$

Considérons maintenant une distribution pour laquelle la rigidité équivalente est égale à K_1. Le ressort applique la soupape sur son siège avec un effort égal à F_0 et la came doit fournir au poussoir une force équivalente à F_0 pour que la soupape commence à s'ouvrir. Par conséquent le système se déforme d'une quantité égale à $\frac{F_0}{K_1}$ et la came tourne d'un angle faible équivalent à cette levée entre le moment où le contact came-poussoir est établi et le moment où la soupape quitte son siège. Puis la came doit produire une force (qui accélère tout le système pendant la période d'accélération positive) proportionnelle à la tension du ressort augmentée de la force d'inertie. Il s'ensuit une compression supplémentaire entraînant un nouveau déphasage entre la levée de came et la levée de soupape, ce qui détermine un mouvement dynamique de la soupape. L'amplitude des mouvements anormaux qui en résultent dépend de l'accélération positive utilisée et du nombre de vibrations naturelles se produisant pendant la période d'accélération positive.

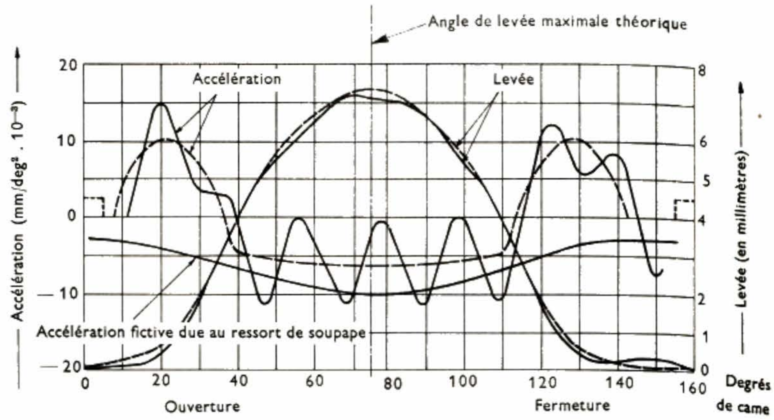


Fig. VI-24

Courbes de réponse pour l'ensemble de distribution à haut régime
- - - - - Caractéristiques théoriques
——— Réponse dynamique

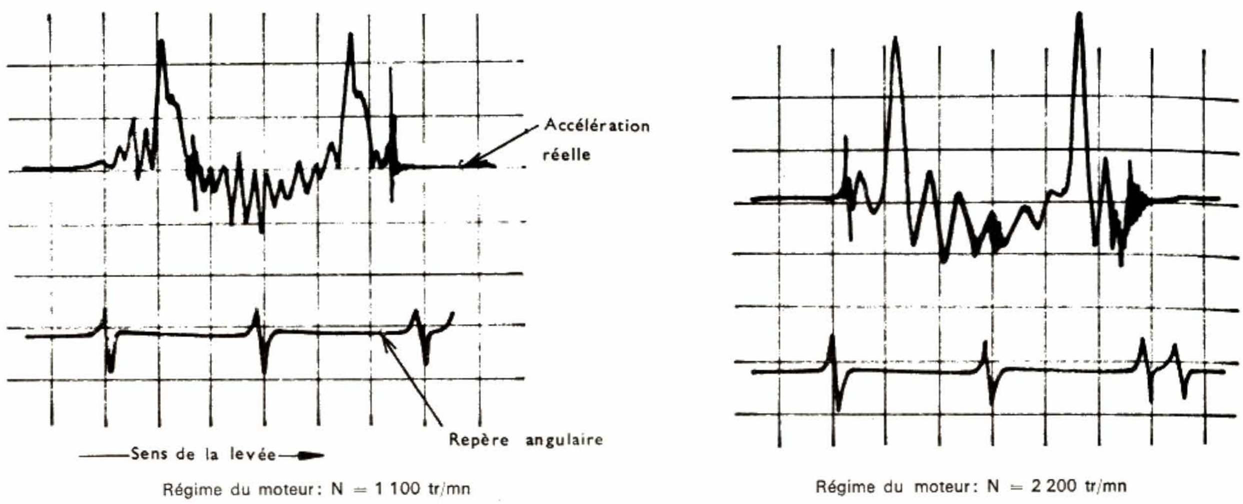


Fig. VI-25 — Relevés expérimentaux d'accélération de soupape sur un moteur à arbre à cames latéral et culbuteurs

Ainsi le mouvement induit de la soupape peut être très différent de celui de la came, surtout quand le régime de fonctionnement est élevé en regard de la fréquence naturelle. C'est ce que montrent les courbes théoriques et expérimentales comparatives de la figure VI-24. Les courbes relatives à l'accélération réelle d'une soupape présentées sur la figure VI-25 ont été enregistrées sur une distribution dont les caractéristiques étaient les suivantes :

— Masse totale : 0,230 kg ; fréquence propre fondamentale : 775 Hz.

— Courbe d'accélération théorique sinusoïdale.

— Durée angulaire : accélération positive 20 degrés de rotation de la came ; accélération négative 45 degrés de rotation de la came.

L'influence de l'augmentation de régime de rotation sur l'évolution de l'accélération apparaît clairement sur ces diagrammes. On remarquera l'effet de l'amortissement sur les oscillations de l'accélération négative et l'importance, croissante avec le régime, du choc à la fermeture dû à la vitesse d'impact de la soupape sur son siège.

CHAPITRE VII

ÉTUDE TECHNOLOGIQUE

La définition d'un nouveau moteur fait généralement l'objet d'une analyse préalable de la part du constructeur. Les questions qui se posent peuvent se résumer de la façon suivante :

— Type de service pour lequel le moteur est prévu et raisons justifiant l'établissement d'un nouveau projet.
— Puissance et rendement requis.
— Meilleur choix pour répondre aux questions demandées :

- Cycle Diesel ou allumage commandé, à deux temps ou à quatre temps.
- Admission atmosphérique ou suralimentée.
- Nombre et disposition des cylindres.
- Refroidissement par eau ou par air.

— Estimation du coût et du temps du développement.
— Estimation du coût des moyens de fabrication.
— Position du produit par rapport aux produits concurrents et appréciation de ses chances de succès sur le marché.

Les réponses à certaines de ces questions concernant plus particulièrement le choix technique sont, en partie, données par l'utilisation de critères dont la valeur résulte notamment de l'expérience acquise sur des réalisations antérieures. Certains de ces critères, tels que la vitesse moyenne de piston et la pression moyenne effective présentent de ce point de vue une signification particulière pour l'établissement d'un avant-projet. Dans le cas de moteurs semblables l'application des lois de la similitude mécanique met d'ailleurs en évidence l'importance de ces facteurs. On démontre en effet que pour deux moteurs semblables, c'est-à-dire deux moteurs sur lesquels les longueurs homologues sont dans un même rapport, les contraintes dans le métal, les valeurs des pertes de charge dans les écoulements autres qu'en régime de Poiseuille (V. t. 3, Mécanique des fluides, chap. 5) et la chaleur à évacuer par unité de surface de paroi et par unité de temps, gardent une valeur constante si les vitesses linéaires correspondantes sont identiques. Autrement dit si ω_1 et ω_2 sont les vitesses angulaires de deux moteurs semblables et l_1 et l_2 les longueurs homologues, les conditions précédentes sont réalisées si $\omega_1 l_1 = \omega_2 l_2$ ou $\omega l =$ Cte.

On traduit généralement cette condition en disant que les deux moteurs doivent avoir même vitesse moyenne de piston mais on pourrait aussi bien parler de la vitesse périphérique du maneton. Les pressions, et en particulier la pression moyenne, étant à peu près conservées $\left(\frac{1}{2}\rho V^2 = \text{Cte}\right)$, le couple est proportionnel au cube des dimensions linéaires l^3 ou à la cylindrée. Quant à la puissance, produit du couple par la vitesse angulaire, elle est proportionnelle à l^2 puisque $\omega l =$ Cte. C'est la raison pour laquelle on rapporte souvent la puissance à la surface du piston pour apprécier si un moteur est chargé ou ne l'est pas. Cette façon de faire est plus correcte que celle qui consiste à diviser la puissance par la cylindrée pour obtenir la « puissance au litre », car cette dernière grandeur est, d'après les considérations précédentes, inversement proportionnelle à la taille du moteur et ne permet donc pas de comparer deux moteurs de taille différente.

En exprimant la puissance W en chevaux (1 ch = 735 W), la surface de piston S en centimètres carrés, la pression moyenne effective p_{me} en bars et la vitesse moyenne de piston U en mètres par seconde, nous pouvons écrire la relation suivante : $\frac{W}{S} = \frac{p_{me} \cdot U}{(2 \text{ ou } 4) \times 75}$ (2 ou 4 selon que le cycle est à deux ou à quatre temps).

Comme les pressions et les vitesses se conservent en similitude, leur produit reste constant, ce qui est conforme au résultat précédent.

En réalité la similitude n'est jamais tout à fait complète.

Si l'on compare entre elles les valeurs du rapport $\frac{W}{S}$ mesurées sur des moteurs de différentes provenances en fonction du rapport entre la course et l'alésage (il peut être considéré comme rapport de similitude géométrique), on observe des écarts appréciables.

Les résultats de la figure VII-1a, obtenus d'après les performances de moteurs construits depuis 1965, montrent à cet égard les écarts existants pour une même catégorie de moteurs et comment se situent entre eux les différents types de moteurs considérés.

Les figures VII-1b et c montrent également pour ces mêmes moteurs l'évolution des pressions moyennes effectives maximales et des vitesses moyennes de piston maximales en fonction du rapport de la course à l'alésage.

Du point de vue de l'ingénieur d'études, la connaissance et l'utilisation de tels résultats sont évidemment très utiles mais certainement pas suffisantes pour la définition complète d'un moteur prototype. L'expérience et l'ingéniosité associées à une documentation bien faite sur le sujet sont aussi nécessaires.

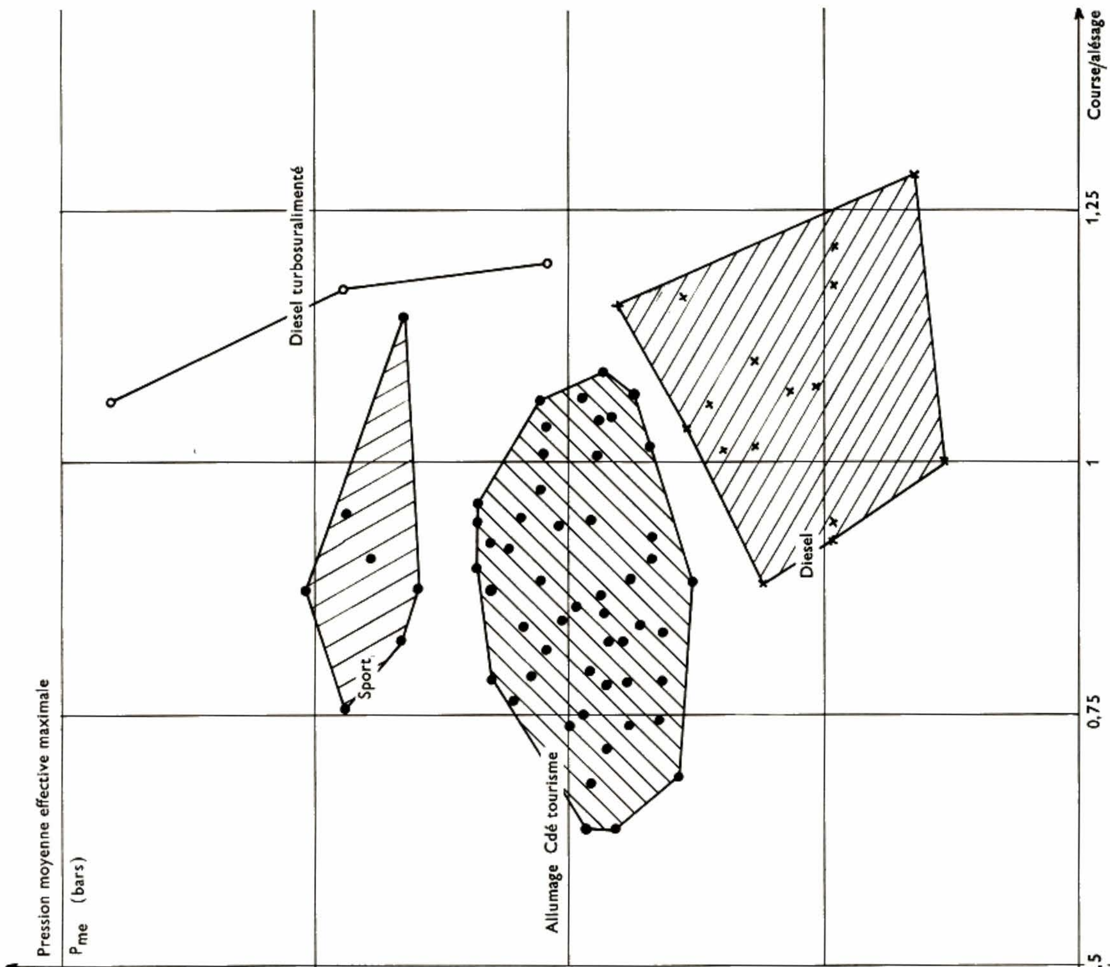


Fig. VII-1 b

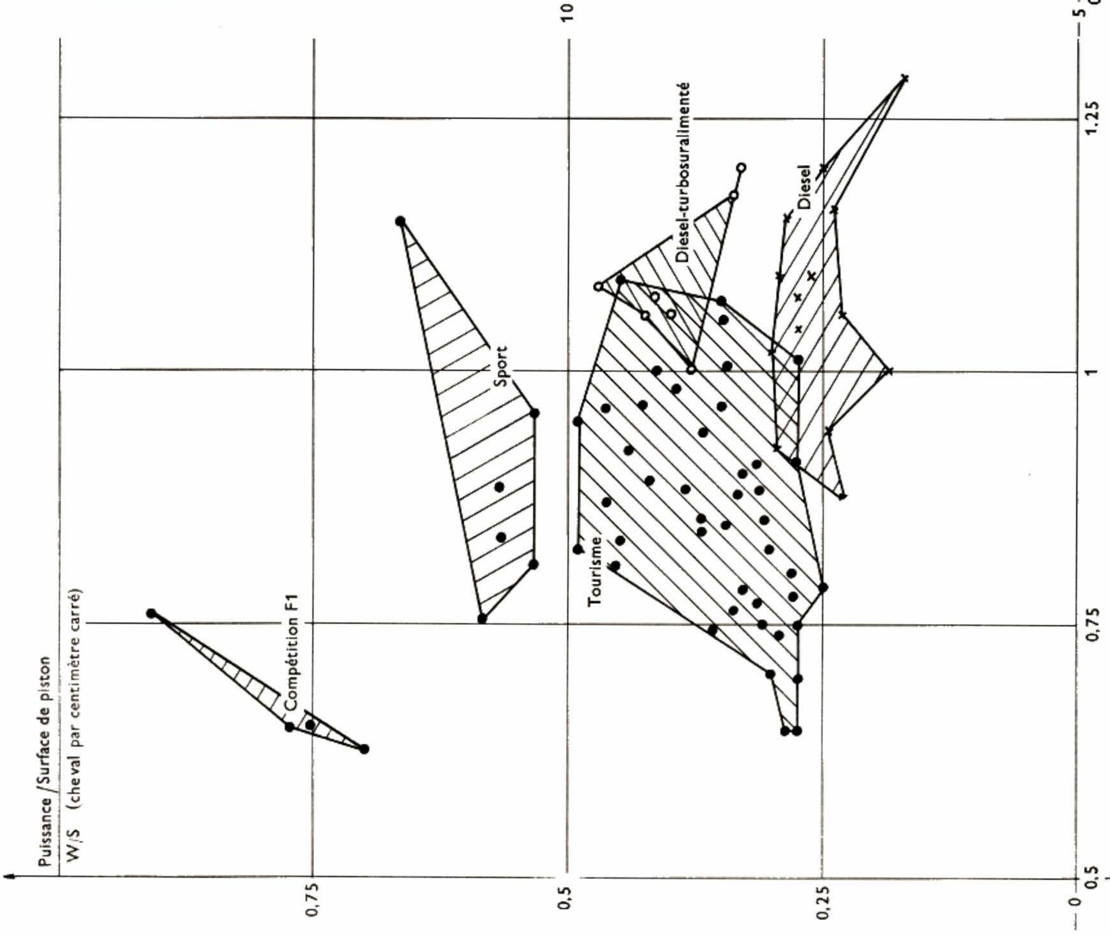


Fig. VII-1 a

Tableau des caractéristiques de différents moteurs

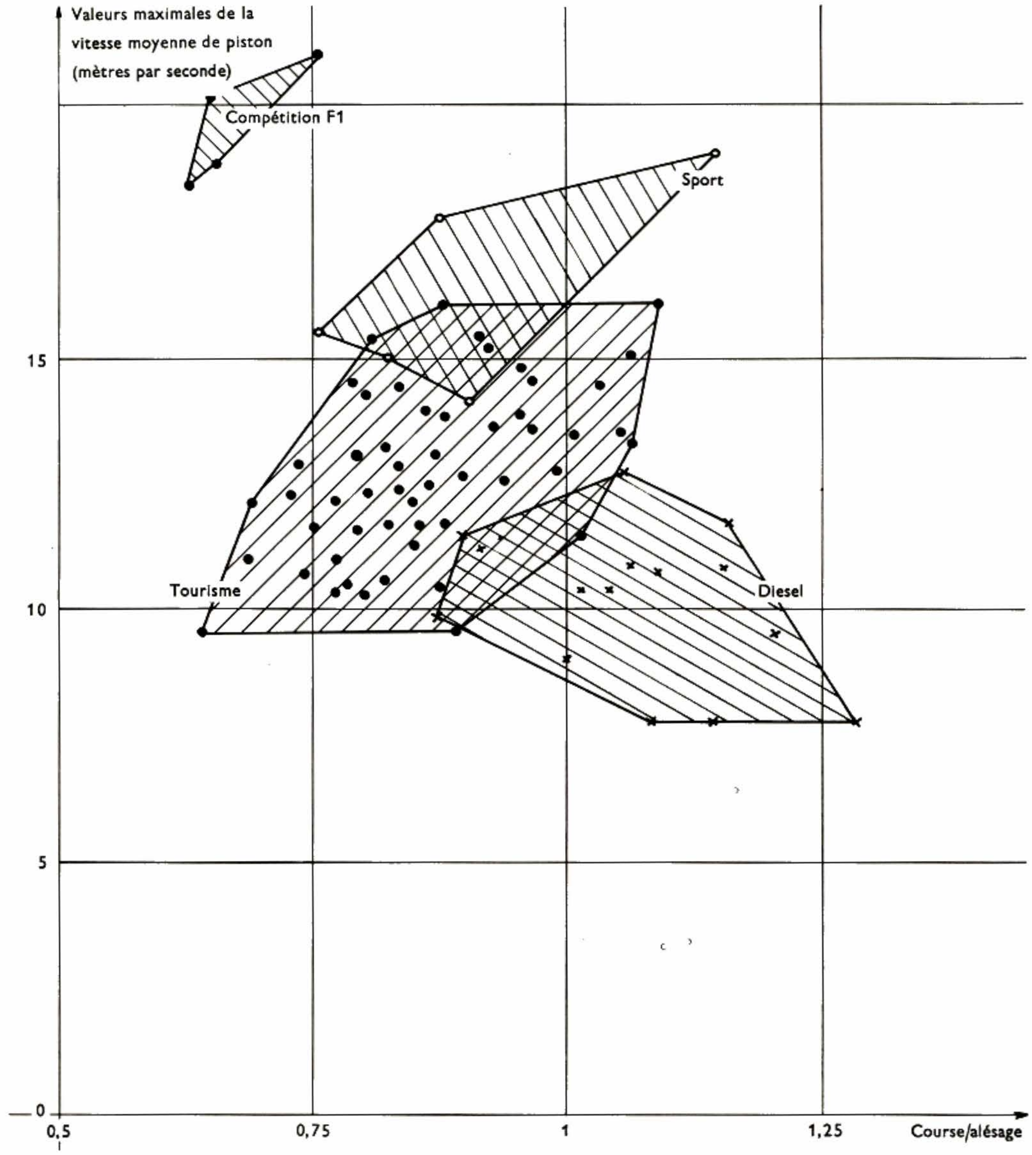


Fig. VII-1 c

Type	Cylindrée (centimètres cubes)	Alésage (millimètres)	Course (millimètres)	Rapport volumétrique	Puissance maximale (chevaux) (1 ch = 735 W)	Couple maximal (newtons-mètres)	Masse (kilogrammes)
1,3 HC	1 294,7	79	66	9	59 à 5 500 tr/mn	100 à 3 000 tr/mn	118,2
1,6 HC	1 596,8	87,6	66	9,2	72 à 5 500 tr/mn	120 à 2 700 tr/mn	119,6
1,6 GT	1 596,8	87,6	66	9,2	88 à 5 700 tr/mn	127 à 4 000 tr/mn	120,9
2,0 HC	1 997,5	90,8	77	9,2	98 à 5 500 tr/mn	154 à 3 500 tr/mn	122,7
2,0 MC	1 997,5	90,8	77	8,6	92 à 5 500 tr/mn	145 à 3 500 tr/mm	119,8

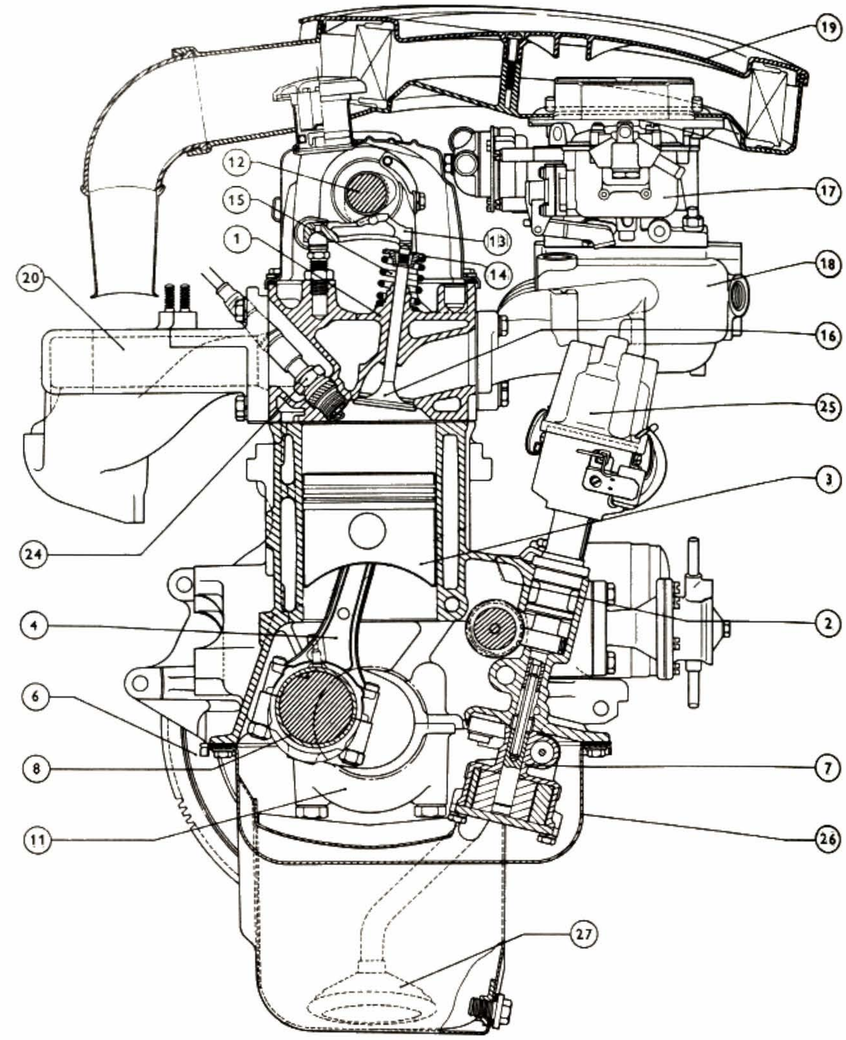


Fig. VII-2 a
1. Culasse
2. Bloc carter cylindre
3. Piston
4. Bielle
5. Vilebrequin
6. Volant et couronne de démarreur
7. Pompe à huile
8. Coussinet de bielle
9. Coussinet de ligne d'arbre
10. Coussinet de palier d'arbre à cames
11. Chapeau de palier de ligne d'arbre
12. Arbre à cames
13. Culbuteur
14. Coupelle de ressort de soupape
15. Ressort de soupape
16. Soupape
17. Carburateur
18. Collecteur d'admission
19. Filtre à air et silencieux d'admission
20. Collecteur d'échappement
21. Courroie crantée de commande de l'arbre à cames
22. Pompe à eau
23. Ventilateur
24. Bougie d'allumage
25. Allumeur
26. Carter inférieur
27. Crépine d'aspiration d'huile

(*Automobile Engineer*)

1. DESCRIPTION D'UN MOTEUR DE SÉRIE

Les figures VII-2 a et b représentent respectivement les coupes transversale et longitudinale partielles d'un moteur d'automobile récent à quatre cylindres, du cycle à quatre temps et à refroidissement par eau. Il s'agit du moteur Ford à distribution par arbre à cames en tête prévu en trois cylindrées (1 300, 1 600 et 2 000 cm³) et destiné à l'équipement de véhicules européens.

Ses principales caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant

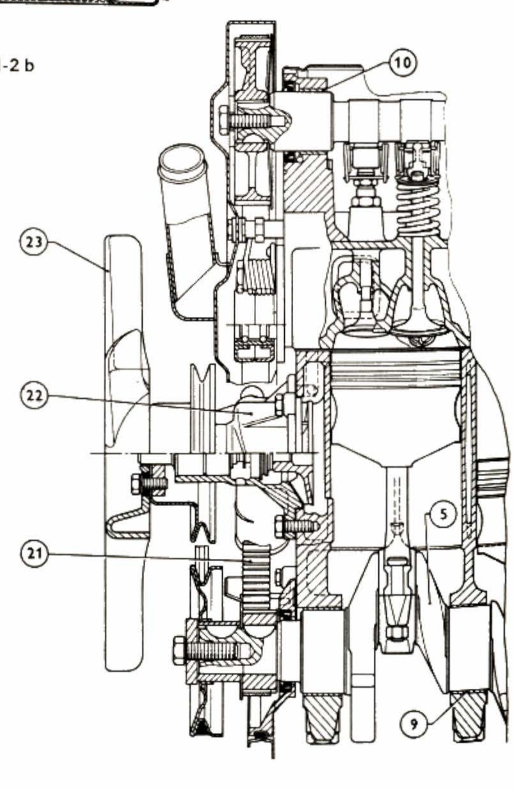
Le bloc cylindre et la culasse sont en fonte. Le vilebrequin à cinq paliers, équilibré par quatre contrepoids, est en fonte à graphite sphéroïdal. Les bielles sont en acier forgé, les pistons en alliage léger et l'arbre à cames en fonte coulée. Les coussinets de bielles et de paliers de ligne d'arbre sont en aluminium-étain ou en cupro-plomb. L'arbre à cames est entraîné par courroie crantée.

2. ÉLÉMENTS FIXES

2.1. Le bloc carter cylindre. — Le bloc carter cylindre doit satisfaire à de nombreuses conditions parmi lesquelles nous citerons : résister aux efforts mis en jeu au cours du cycle, présenter une rigidité suffisante pour assurer un guidage correct des organes mobiles, permettre le transfert de la chaleur des parois (en contact direct ou indirect avec les gaz) à l'eau de refroidissement, être d'un encombrement et d'un poids aussi faibles que possible, être le moins coûteux possible, etc.

Toutes ces conditions ne sont pas forcément compatibles et les nombreuses solutions existantes représentent

Fig. VII-2 b



bien souvent l'aboutissement de la recherche du meilleur compromis par chaque constructeur.

À l'origine les moteurs de série comportaient un carter de vilebrequin sur lequel venait se fixer l'ensemble culasse-carter-cylindre formant généralement une pièce unique. Pour cette raison le cylindre était appelé « cylindre borgne ». Cette disposition se rencontre toujours sur certains moteurs à refroidissement par air et est réapparue récemment sur les moteurs Diesel Leyland type 500 et 520 (fig. VII-3).

Par la suite la séparation du bloc cylindre (formant également carter de vilebrequin) de la culasse s'est généralisée en raison des possibilités offertes par le déplacement du plan de joint en ce qui concerne le dessin de la chambre

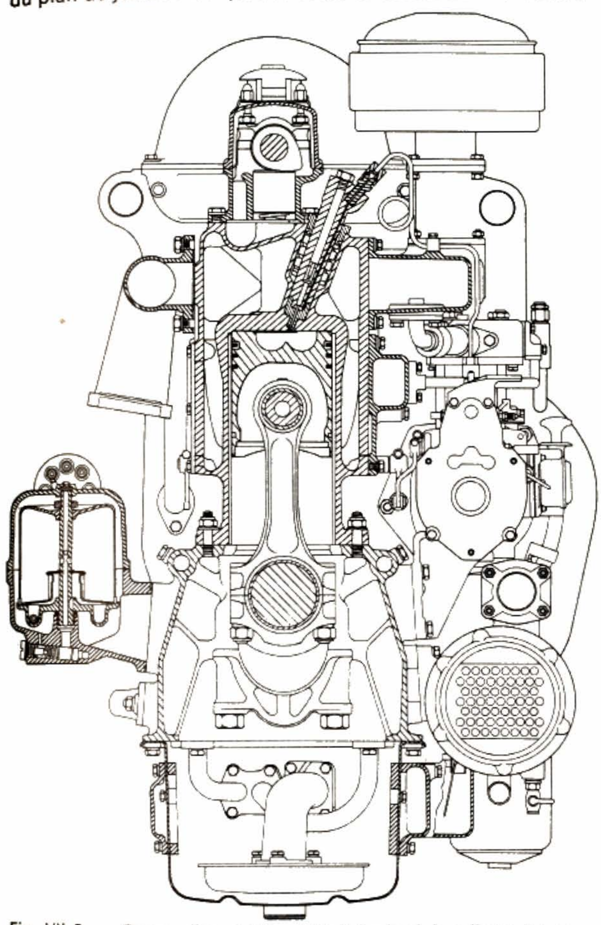


Fig. VII-3 — Coupe d'un moteur Diesel Leyland à cylindre borgne (*Automobile Engineer*)

de combustion, l'accès aux soupapes et aux pistons et l'usinage des cylindres. En contrepartie la nécessité d'assurer au plan de joint l'étanchéité aux gaz, à l'eau de refroidissement et fréquemment à l'huile, a entraîné l'utilisation d'un joint de culasse dont la tenue n'est pas toujours sans poser de problèmes.

On rencontre deux dispositions fréquentes du bloc carter cylindre des moteurs à refroidissement par eau. La première de ces dispositions comporte un carter cylindre en fonte coulée ou en aluminium (AS 10 UA ou AS 7 U3) coulé sous pression, avec des chemises rapportées. Dans la seconde solution, les cylindres sont venus directement de fonderie avec le bloc en fonte perlitique ou, plus récemment, en fonte non alliée dite « à l'étain ». Cette solution économique est la plus répandue en automobile.

On distingue trois types de chemises rapportées (fig. VII-4) : les chemises sèches (1,75 à 2 mm d'épaisseur), les chemises humides pendues, les chemises humides en compression. L'usage des chemises sèches permet de dissocier le matériau du cylindre de celui du bloc cylindre ; elles sont généralement en fonte comportant des additifs destinés à augmenter la dureté ; on les moule sur coquille ou sur noyau en coulée statique ou centrifuge. Cette solution peut présenter l'inconvénient d'un moins bon refroidissement du cylindre en raison de la discontinuité du métal entre les parois de la chemise et du bloc cylindre. Elle est en usage sur de nombreux types de moteur Diesel de moyenne puissance de fabrication anglaise. Par rapport aux chemises sèches, l'emploi des chemises humides présente les avantages d'une grande simplification de la fonderie du carter cylindre, d'un meilleur refroidissement du cylindre et il facilite le remplacement en ne nécessitant pas de reprise d'usinage. Cependant, une géométrie correcte est plus difficile à obtenir en raison des déformations de montage, notamment sur la disposition en compression.

La solution des chemises suspendues est fréquemment utilisée sur les moteurs Diesel de fabrication allemande. Le haut de la chemise comporte une collerette serrée entre le bloc cylindre et la culasse ; à la partie basse l'étanchéité à l'eau se fait par un joint torique simple ou double ou par un joint à section carrée en compression. Les deux systèmes d'étanchéité permettent la libre dilatation de la chemise avec les variations de température.

Les chemises en compression ne sont employées actuellement qu'en moteur à allumage commandé. Une solution intermédiaire consiste à réaliser l'appui dans la première moitié supérieure de la chemise. Cette solution autorise un meilleur refroidissement du haut de cylindre.

La face interne du cylindre, sur laquelle frotte le piston, dans tous les cas de fonctionnement doit satisfaire à certaines conditions de géométrie, de résistance à l'usure, de température si l'on veut éviter des consommations d'huile et un débit de *blow-by* excessifs, les grippages de jupe de piston et l'usure anormale des segments d'étanchéité. L'état de surface du cylindre est généralement obtenu par

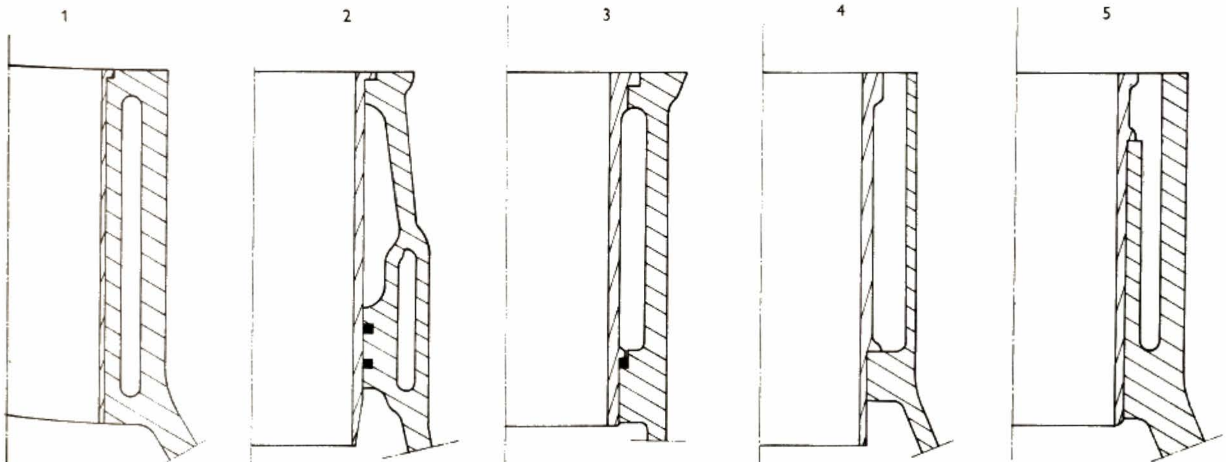


Fig. VII-4 — 1. Chemise sèche. — 2. Chemise humide pendue appuyée en haut. — Étanchéité par deux joints toriques. — 3. Chemise humide pendue appuyée en haut. — Étanchéité par un joint à section carrée. — 4. Chemise humide en compression appuyée en bas. — 5. Chemise en compression partielle

pierrage en traits croisés donnant une rugosité plus ou moins grande et suivant des angles d'hélice différents selon les constructeurs. Ainsi le rodage peut être réalisé en un temps suffisamment court.

Sur certains moteurs à refroidissement par air on réalise également des cylindres en alliage léger munis d'une chemise mince en acier nitruré ou en fonte (procédés: Alfin, Biral, Ferral) ou bien on chrome directement l'intérieur du cylindre par un procédé galvanoplastique. Dans ce dernier cas deux solutions permettent d'augmenter l'adhérence de l'huile : le chromage poreux ou le guillochage. Les cylindres du type « Nikasil », récemment mis au point par la société Mahle, ont un revêtement de nickel avec des inclusions de carbure de silice.

Le dimensionnement général du carter (fig. VII-5) est en rapport direct avec le nombre et la disposition des cylindres, le nombre de paliers, le dessin des éléments de l'attelage mobile et le type de refroidissement.

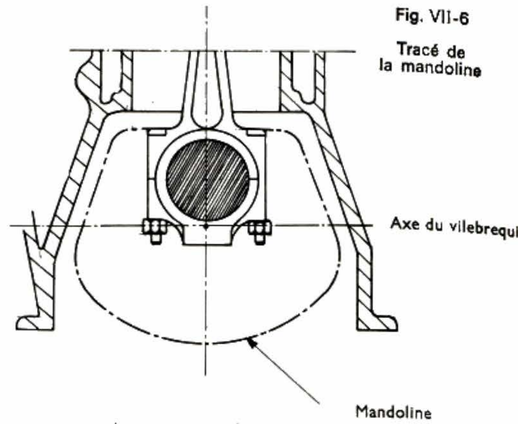


Fig. VII-6
Tracé de la mandoline

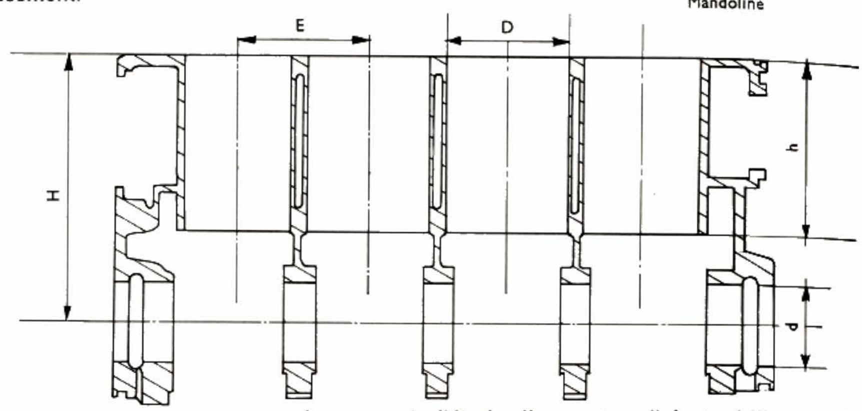


Fig. VII-5
Dimensionnement du carter cylindre

La hauteur H du carter par rapport à l'axe de la ligne d'arbre s'examine en fonction des positions extrêmes de la manivelle de rayon R et de l'attelage mobile. Quant à l'entraxe E des cylindres, sa valeur est généralement conditionnée par la valeur de l'alésage, le type de chemise et la section des passages d'eau entre les cylindres. L'examen de moteurs de série à refroidissement par eau permet de donner quelques caractéristiques se rapportant aux moteurs à cylindres en ligne et en V :

Désignation	Valeur		
	minimale	moyenne	maximale
$\frac{H}{2R}$	2,55	2,90	3,25
$\frac{h}{H}$	0,55	0,64	0,73
$\frac{E}{D}$	1,10	1,18	1,27

Au cours de l'étude d'un moteur il faut vérifier que la mandoline (lieu des points extrêmes décrits par la tête de bielle au cours d'une rotation complète, fig. VII-6) n'interfère pas avec le cylindre ou le carter de vilebrequin. Cette condition dépend de la forme de la tête de bielle, du rapport course-alésage et du rapport bielle-manivelle. Les paliers dans lesquels tourillonne le vilebrequin sont dimensionnés en fonction des efforts transmis par le vilebrequin (diagrammes polaires des efforts ; V. chap. 6, § 1.5). Le palier est généralement constitué d'une partie venue de fonderie avec le bloc cylindre et solidement nervurée et d'une partie amovible appelée « chapeau de palier », assemblée à la première par vis ou goujon. À l'intérieur du palier se trouve un coussinet (constitué de deux demi-coussinets) arrêté en rotation par des encoches et soumis à un serrage par l'assemblage du chapeau de palier au carter. La figure VII-7 représente trois dispositions de paliers couramment utilisées. Les dispositions *a* et *b* se rapportent aux moteurs à allumage commandé à cylindres en ligne ou en V et aux moteurs Diesel à cylindres en ligne. La disposition *c* est propre aux moteurs Diesel à cylindres en V en raison des efforts transversaux élevés que doivent supporter les paliers de ces moteurs. Le positionnement du chapeau se fait par pied ou douilles de centrage (disposition *a*) ou par encastrement (disposition *b* et *c*).

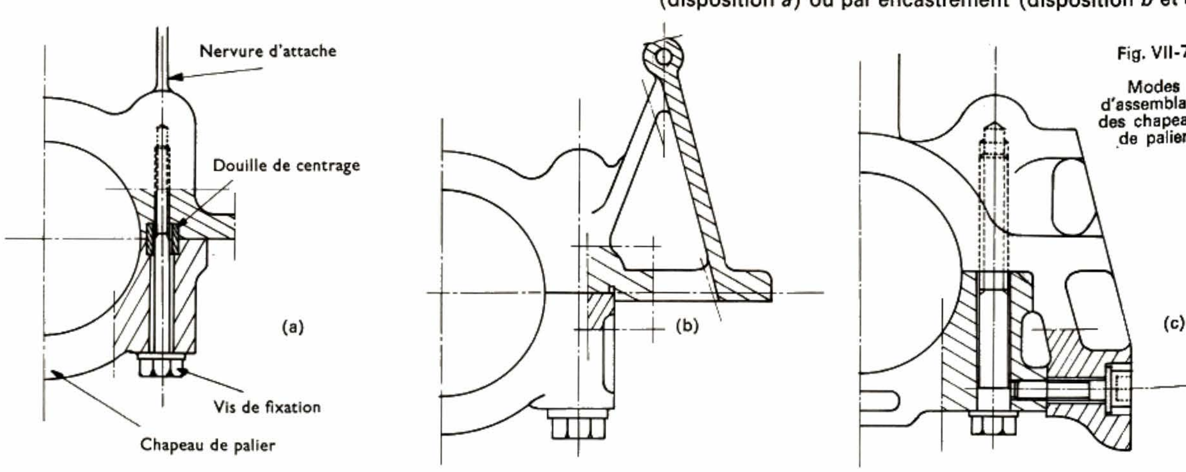


Fig. VII-7
Modes d'assemblage des chapeaux de palier

Les chapeaux de palier sont généralement en fonte. Les vis d'assemblage sont en acier traité pour une résistance de 100 à 120 daN/mm² au minimum. Le dimensionnement de la vis dépend des efforts alternés transmis par le vilebrequin, de l'effort nécessaire à la mise en compression du coussinet, du rapport entre l'effort de serrage au plan de joint du palier ; la somme des efforts précédents est fonction du coefficient de sécurité que l'on se fixe du point de vue de la résistance des matériaux (80 % de la limite élastique, par exemple). Quant au couple de serrage il est déterminé par le calcul et l'expérimentation compte tenu des conditions qui précèdent et de la valeur des coefficients de frottement dans le filetage et sous la tête de vis (V. § 3.2, à propos de l'assemblage de la tête de bielle).

Avant l'année 1960, les moteurs à quatre cylindres à allumage commandé comportaient trois paliers. Depuis cette date l'utilisation des cinq paliers s'est généralisée en raison de l'augmentation des pressions maximales de cycle et des vitesses de rotation.

2.2. La culasse. — La culasse limite la chambre de combustion. Elle comporte : la bougie d'allumage ou l'injecteur sur les moteurs Diesel, les éléments de la distribution (en partie ou en totalité, selon que l'arbre à cames est latéral ou en tête), les conduits d'admission et d'échappement. Pratiquement les performances globales du moteur sont déterminées par le dessin de la culasse et c'est la raison pour laquelle sa configuration générale doit être définie dès l'origine d'une nouvelle étude. Si la définition du moteur est fixée sans un examen préalable de la culasse, des problèmes se poseront inévitablement par la suite. Par exemple, la courbe de remplissage, donc de couple, dépend du diamètre des soupapes ; on est généralement limité dans ce domaine par le rapport course-alésage choisi et par la disposition des soupapes adoptée. Pour cette raison les performances désirées et le dessin de la culasse doivent bien être le point de départ de l'étude.

En pratique un grand nombre d'autres facteurs doivent être pris en considération : utilisation éventuelle d'une culasse commune pour une même famille de moteurs, emplacement disponible sur le véhicule, adaptation aux moyens de production, etc.

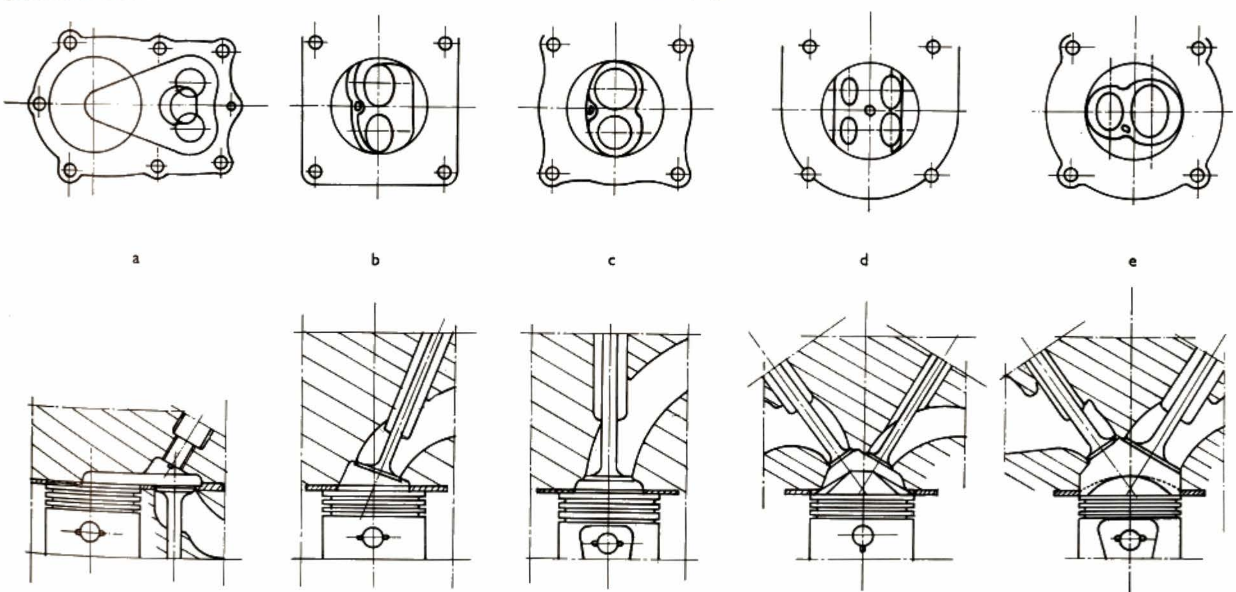


Fig. VII-8 — Soupapes latérales : a. — Soupapes parallèles : b, chambre en coin et c, chambre baignoire. — Soupapes en V : d, chambre en toit et e, chambre hémisphérique. La version d à 4 soupapes est plus particulièrement utilisée sur certains moteurs de compétition

La forme des chambres de combustion, la disposition des soupapes et le mode de refroidissement caractérisent essentiellement le dessin de la culasse. Il existe de nombreux types de chambre et de dispositions de soupapes ; la figure VII-8 montre les dispositions les plus courantes sur un moteur à allumage commandé. La figure VII-9 correspond à une disposition proche de celle utilisée en diesel ; elle comporte une culasse plate avec la chambre centrée

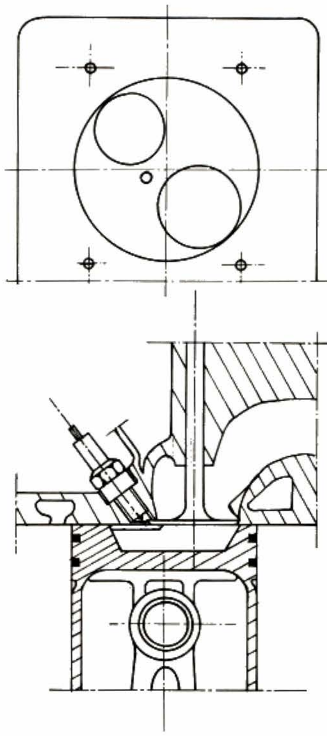


Fig. VII-9

Culasse plate avec chambre de combustion dans le piston

dans le piston (V. fig. VII-9). Cette disposition, dénommée chambre « Héron » ou « Pot dans le piston », a connu un certain essor. Les éléments techniques à considérer pour la comparaison de ces différentes solutions peuvent se résumer de la façon suivante :

— Diamètres et positions relatives des soupapes en raison de l'influence de ces paramètres sur le remplissage et le balayage de chambre.

— Position de la bougie d'allumage ; distances par rapport au point le plus éloigné et par rapport au point le plus chaud de la chambre ; refroidissement de la bougie.

— Refroidissement des sièges de soupapes.

— Absence d'arêtes vives susceptibles de former des points chauds.

— Rapport surface-volume, rapport de la surface de chasse et de la surface du piston, turbulence d'admission (en

raison de leur influence sur le rendement et la pollution dont la réglementation devient de plus en plus contraignante).

En ce qui concerne les moteurs Diesel de faible ou moyenne puissance on rencontre essentiellement deux types de chambre de combustion : la préchambre dont le volume principal est situé dans la culasse et la chambre ouverte située dans le piston (fig. VII-10), généralement associée à un conduit d'admission dont la forme engendre une très forte turbulence d'admission (conduit en forme de volute ou soupape à déflecteur).

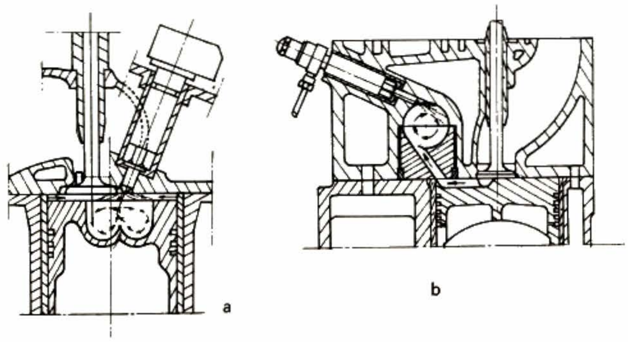


Fig. VII-10 — Disposition de la chambre de combustion de moteurs Diesel (a : chambre ouverte dans le piston ; b : préchambre dans la culasse)

Les matériaux utilisés pour la réalisation des culasses sont la fonte FT 22 et l'alliage léger AS 5 UB pour les moteurs à allumage commandé, uniquement la fonte pour les moteurs Diesel.

Les culasses en alliage léger sont généralement d'un prix de revient plus élevé que les culasses en fonte en raison du prix de la matière et de la nécessité de rapporter des guides et des sièges de soupape. Elles présentent toutefois l'avantage d'un meilleur refroidissement de la chambre car le coefficient de conductibilité thermique est deux à trois fois supérieur à celui de la fonte et autorise de ce fait un rapport volumétrique plus grand.

Les sièges de soupapes pour les culasses en alliage léger et les culasses en fonte de moteurs Diesel sont frettés dans la culasse. Les serrages relatifs préconisés sont 2,5 à $4{,}5.10^{-3}$ mm dans l'alliage léger et 1,5 à $2{,}5.10^{-3}$ mm dans la fonte.

Avant l'emmanchement, la culasse est chauffée à environ 160 °C et le siège refroidi dans l'azote liquide de manière à compenser le serrage. Si l'on rapporte l'épaisseur radiale e et la hauteur h du siège à son diamètre intérieur d, on obtient généralement : $e = 0{,}12\ d$; $h = 0{,}15$ à $0{,}30\ d$.

Les guides de soupapes sont nécessaires sur les culasses en alliage léger. Ils sont généralement en fonte ou en bronze et emmanchés à force avec un serrage de 0,06 à 0,13 mm suivant leur diamètre ; le diamètre intérieur est repris ensuite à l'alésoir. La longueur de guidage est environ six à sept fois le diamètre intérieur ; l'épaisseur radiale est de 2 à 3 mm.

La disposition et le profil intérieur des conduits d'admission peuvent être très différents d'un moteur à l'autre selon le but recherché et selon la disposition des soupapes. Sur les culasses à soupapes parallèles les conduits d'admission et d'échappement peuvent déboucher d'un côté et de l'autre de la culasse ou d'un même côté. Dans le premier cas, le refroidissement des conduits d'échappement et du guide est facilité ; l'obtention d'un bon rendement volumétrique du moteur est rendu possible par le dessin du conduit d'admission et par le peu d'échange thermique avec le conduit d'échappement. Dans le second cas, le prix de revient est moins élevé et la disposition d'un point chaud dans la tubulure d'admission est facilitée. Dans l'avenir il faudra aussi tenir compte de l'utilisation éventuelle d'un réacteur à la sortie de la culasse, sur le conduit des gaz d'échappement ; cela aura une incidence certaine sur le dessin des conduits (V. chap. 12).

Les figures VII-11 a et b représentent les coupes de culasses à soupapes en V et à soupapes parallèles. Au cours de l'étude d'une culasse il est important d'examiner de très près le schéma de circulation d'eau car cette pièce évacue une grande partie du flux thermique et risque donc d'être soumise à des déformations thermiques importantes.

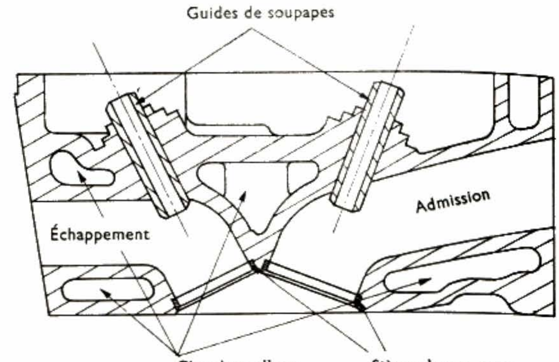


Fig. VII-11 a

Coupe schématique de culasse à soupapes en V

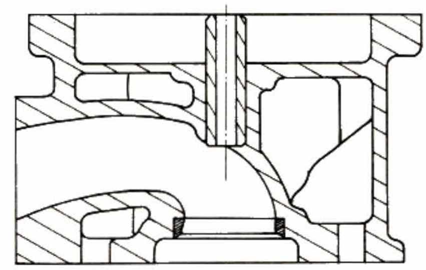


Fig. VII-11 b

Coupe de culasse à soupapes parallèles et conduits débouchant d'un même côté de la culasse

2.3. Assemblage de la culasse et du bloc cylindre. La culasse est fixée sur le bloc cylindre par des vis ou des goujons. Un joint de culasse est interposé entre les plans de joint de la culasse et du carter de façon à assurer l'étanchéité aux gaz sous pression et à températures élevées, à l'eau de refroidissement et à l'huile de graissage de la culasse. Le joint de culasse doit compenser toutes les inégalités de surface des plans de joint ainsi que les déformations thermiques en cours de fonctionnement ; par ailleurs il doit résister aux produits avec lesquels il est en contact.

La planéité des surfaces de contact et la répartition régulière de la pression de serrage du joint sont deux conditions nécessaires à la parfaite étanchéité de la culasse. La flexion des éléments de l'assemblage, les déformations statiques et thermiques ont toujours des effets nuisibles. Pour limiter ces effets en fonctionnement, il est indispensable d'observer certaines règles au cours de l'étude.

2.3.1. Disposition des vis de culasse. — La pression superficielle requise pour l'étanchéité est obtenue par des vis prévues en nombre suffisant (4, 5 ou 6 par cylindre) et disposées convenablement. Leur nombre et leurs dimensions se déterminent en fonction des pressions maximales de combustion, du diamètre de l'alésage, du rapport de précontrainte de l'assemblage et de la pression superficielle minimale requise.

Elles doivent éviter les obstacles dans la culasse (bossage de bougie, conduits, éléments de la distribution, etc.) et rester suffisamment accessibles pour être aisément resserrées. Les vis doivent être situées au plus près de l'alésage et réparties régulièrement. La ligne brisée reliant les vis doit, dans la mesure du possible, être tangente à l'alésage ou s'approcher de la tangente, mais on doit éviter qu'elle coupe l'alésage (fig. VII-12).

2.3.2. Épaisseur de la plaque d'étanchéité et hauteur de la culasse. — Pour empêcher la flexion du plan de joint, l'épaisseur de la plaque d'étanchéité doit être à peu près égale au diamètre de la vis ou au dixième du diamètre de l'alésage (le moment d'inertie de la plaque augmente comme la puissance 3 de l'épaisseur). Par ailleurs, la hauteur de la culasse doit être suffisante ; on admet en général que la hauteur de la culasse doit être égale ou supérieure à l'écartement moyen des vis pour les moteurs Diesel et égale à 0,8 fois environ cette valeur pour les moteurs à allumage commandé.

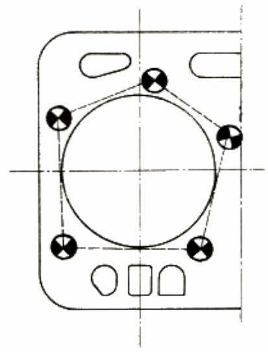


Fig. VII-12

Schéma de disposition des vis de culasse

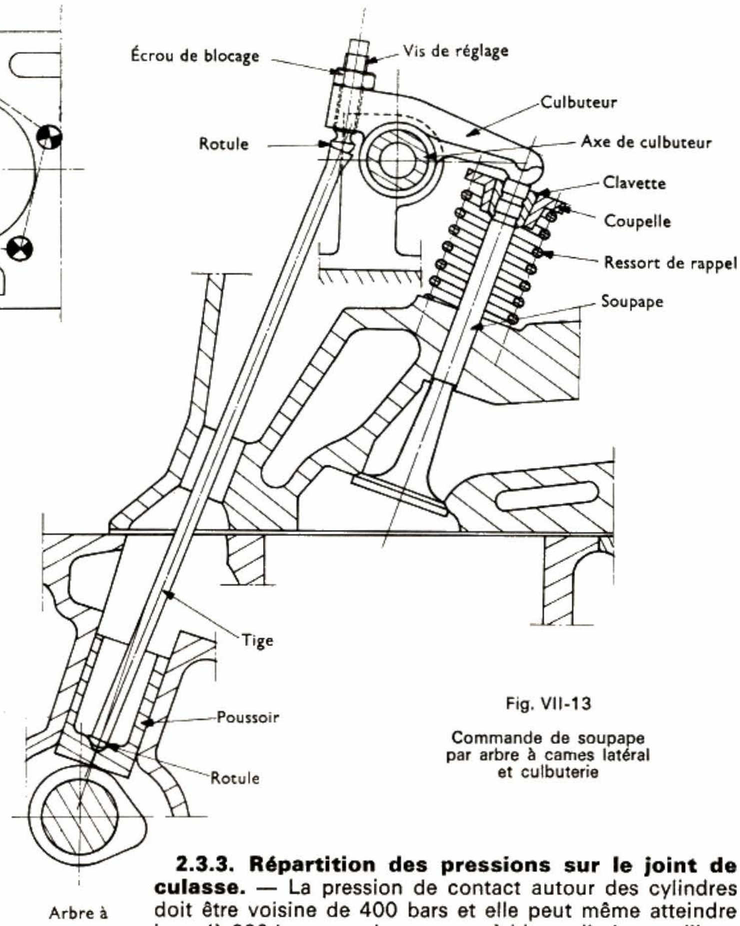
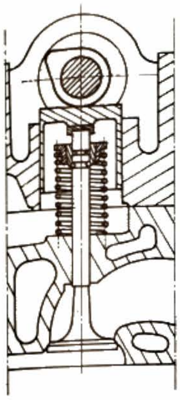


Fig. VII-13

Commande de soupape par arbre à cames latéral et culbuterie



a) Attaque directe par poussoir

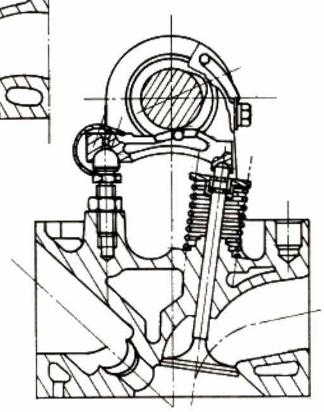
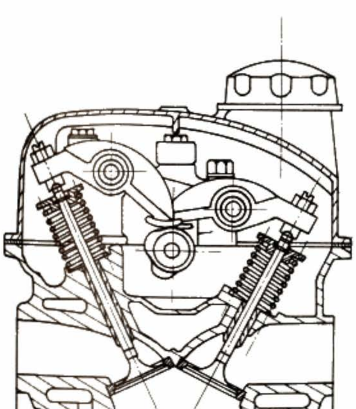
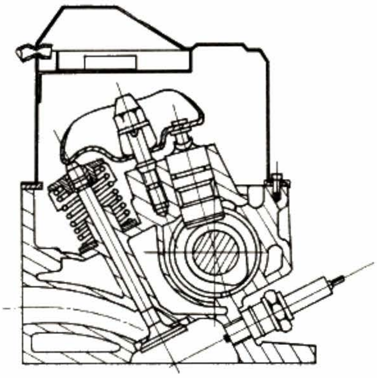


Fig. VII-14

b) Attaque par linguet



c) Attaque par culbuteur



d) Attaque par poussoir et culbuteur

2.3.3. Répartition des pressions sur le joint de culasse. — La pression de contact autour des cylindres doit être voisine de 400 bars et elle peut même atteindre jusqu'à 600 bars pour les moteurs à bloc cylindre en alliage léger et chemises fonte en compression. Dans ce dernier cas, on détermine le dépassement de la chemise pour obtenir cette valeur. Les pressions nécessaires pour assurer l'étanchéité à l'eau et à l'huile sous pression sont beaucoup plus faibles : 50 à 100 bars pour l'eau et 2 à 10 bars pour l'huile.

2.3.4. Couple de serrage des vis. — On démontre que les fluctuations d'efforts dans les vis dues aux variations périodiques de la pression des gaz et à l'élasticité des différents éléments de l'assemblage sont faibles. De ce fait, une vis de culasse peut être serrée près de sa limite élastique (80 % environ) car il y a plus de risque de lui faire subir un excès de couple au serrage que de la rompre par fatigue en fonctionnement. Les vis sont en acier traité pour obtenir une résistance élevée (dureté comprise entre 10 et 12 kbar).

3. ÉLÉMENTS MOBILES

3.1. La commande des soupapes. — Le type de commande le plus répandu actuellement est la commande par arbre à cames latéral, situé dans le bloc cylindre, et culbuterie avec soupapes en tête (fig. VII-13). Cependant, depuis quelques années, la commande par arbre à cames en tête entraîné par courroie crantée est de plus en plus fréquente sur les moteurs de série. Les schémas de la figure VII-14 représentent quatre dispositions de commandes par simple arbre à cames en tête. Les moteurs à performances élevées sont généralement à double arbre à cames en tête, à attaque directe, entraînées par pignons ou par chaîne.

Tous les systèmes de commande comprennent un élément de réglage de jeu afin d'assurer une bonne fermeture de la soupape en dehors de la levée (V. chap. 6, § 4.2).

L'arbre à cames comporte généralement : une came par soupape, les paliers (au nombre de trois, par exemple, pour un moteur quatre cylindres en ligne), le pignon

d'entraînement de l'allumeur et de la pompe à huile sur les moteurs à arbre à cames latéral à allumage commandé, une came supplémentaire destinée à la commande de la pompe à essence, un élément d'assemblage pour le montage du pignon d'entraînement, une butée de latéral. L'arbre à cames brut est obtenu par coulée, traité à la coulée ou au chalumeau et usiné ensuite. Pour certaines applications particulières il peut être directement usiné dans une ébauche cylindrique préalablement traitée. Le montage de l'arbre à cames dans le bloc carter-cylindre nécessite que le diamètre des paliers soit supérieur ou égal au rayon de base de la came augmenté de la levée. Les paliers de l'arbre à cames tourillonnent directement dans la fonte du carter ou dans des bagues minces en acier recouvertes de cupro-plomb emmanchées à force dans le carter.

Le contact de la came avec le poussoir ou avec le culbuteur, selon le type de commande, se fait suivant une surface elliptique dont les caractéristiques peuvent être déterminées par la théorie de Hertz. Le calcul des pressions de contact sur cette surface est nécessaire pour le choix des matériaux, des traitements thermiques et de la largeur de la came.

— *Came et poussoir plan.* — Pour un poussoir plan la pression de contact maximale est donnée par la formule suivante :

$$p = 0{,}798 \sqrt{\frac{F}{2\, l \rho_C \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right]}}$$

avec :

F : effort entre came et poussoir ;
ρ_C : rayon de courbure de la came (V. chap. 6, § 4.2) ;
l : largeur de la came ;
E_1, ν_1 : module d'élasticité et coefficient de Poisson de la came ;
E_2, ν_2 : module d'élasticité et coefficient de Poisson du poussoir.

— *Came et culbuteur à patin courbe* (V. fig. VII-14 b et c). Dans ce cas :

$$p = 0{,}798 \sqrt{\frac{F}{2\, l} \cdot \frac{\frac{R + \rho_C}{R \cdot \rho_C}}{\left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right]}}$$

avec :

R : rayon de courbure du patin ;
ρ_C, E_1, ν_1 : même signification que ci-dessus ;
E_2, ν_2 : module d'élasticité et coefficient de Poisson du patin.

Lorsque dans cette expression R tend vers l'infini, nous retrouvons bien la formule précédente.

— *Came et poussoir sphérique.* — Certains constructeurs réalisent l'usinage sphérique de la face du poussoir avec un rayon R compris entre 0,75 et 2,5 m ; dans ce cas, la pression de contact est donnée par la formule suivante :

$$p = \frac{1{,}5 \cdot F}{\pi \cdot c \cdot d}$$

avec :

$$c = \alpha \sqrt[3]{\frac{F \cdot \delta}{K}}$$

$$d = \beta \sqrt[3]{\frac{F \cdot \delta}{K}}$$

$$\delta = \frac{4\, \rho_C}{1 + \frac{2\, \rho_C}{R}}$$

et :

$$K = \frac{8}{3} \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{E_2(1-\nu_1^2) + E_1(1-\nu_2^2)}$$

les symboles ayant la même signification que précédemment ; α et β sont données dans le tableau suivant avec :

$$\theta = \text{Arc cos} \frac{1}{1 + \frac{2\, \rho_C}{R}}$$

θ (degrés)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
α	∞	6,612	3,778	2,731	2,136	1,754	1,486	1,284	1,128	1,00
β	0	0,319	0,408	0,493	0,567	0,641	0,717	0,802	0,893	1,00

Les couples de matériaux les plus répandus sur les moteurs d'automobiles de série sont indiqués dans le tableau suivant :

Arbre à cames	*Poussoir*
Fonte trempée à la coulée	Fonte trempée à la coulée Acier trempé haute fréquence Acier cémenté
Fonte trempée haute fréquence Acier cémenté	Fonte trempée à la coulée

Des pressions de contact entre came et poussoir supérieures à 7,5 kbar provoquent le « pitting » (fatigue de surface).

En pratique il est difficile d'obtenir une répartition uniforme de la charge entre came et poussoir. Pour remédier à cet inconvénient on peut usiner le poussoir en tonneau, ce qui présente toutefois le désavantage de l'accroissement du niveau sonore du moteur.

Un léger décalage latéral de la came (environ 0,5 à 1 mm) entraînant la rotation du poussoir est parfois pratiqué pour améliorer la répartition des charges. L'influence de cette rotation sur l'usure par *pitting* donne des résultats différents selon les expérimentateurs. Des états de surface proche de 6 à 15 micro-inch (0,15 à 0,38 µm environ) sont exigés pour l'usinage des cames.

Les traitements de surface tel que le « parco-lubrite » sont recommandés pour améliorer la tenue mécanique. Signalons aussi que l'effet sur le *pitting* de la vitesse de glissement entre came et poussoir n'est pas négligeable mais reste encore assez mal connu.

La tige de culbuteur se calcule au flambage car sa longueur est importante par rapport à sa section. Pour cette raison et aussi pour tenir compte de la nécessité d'obtenir une fréquence propre de la commande aussi élevée que possible (V. chap. 6, § 4.4), la tige doit être courte et le moment d'inertie de sa section doit être grand. Pour ces mêmes raisons il faut choisir un matériau de grand module d'élasticité et de faible masse volumique. En effet, si E, ρ, l, S sont respectivement le module d'élasticité, la masse volumique, la longueur et la section de la tige, la rigidité a pour valeur $K = \frac{ES}{l}$, la masse de la tige est égale à $M = \rho S l$ et la fréquence propre de la tige est proportionnelle à $\sqrt{\frac{K}{M}} = \sqrt{\frac{E}{\rho l^2}}$, ce qui justifie bien la remarque précédente.

Le culbuteur inverse le sens du mouvement issu de la came et permet de multiplier ce mouvement dans le rapport 1,4 à 1,7. On distingue essentiellement deux types de culbuteur : le culbuteur à axe et le culbuteur à rotule (fig. VII-15 a et b).

Ceux du premier type sont en acier forgé, en acier coulé à 45 % de carbone ou en fonte GS. Les autres sont en tôle d'acier emboutie ou en fonte GS durcie par traitement. La rigidité du culbuteur doit être aussi grande que possible compte tenu de sa masse. Le réglage des jeux de fonctionnement sur la distribution par arbre à cames en tête à poussoir pose un problème de commodité. Quelques solutions utilisées sont représentées sur la figure VII-16. Notons que l'emploi des solutions b et c nécessite la dépose de l'arbre à cames pour effectuer le réglage.

Le ressort de rappel de soupape se détermine en fonction de la masse en mouvement, de l'accélération négative communiquée par la came (V. chap. 6, § 4.3) et de la

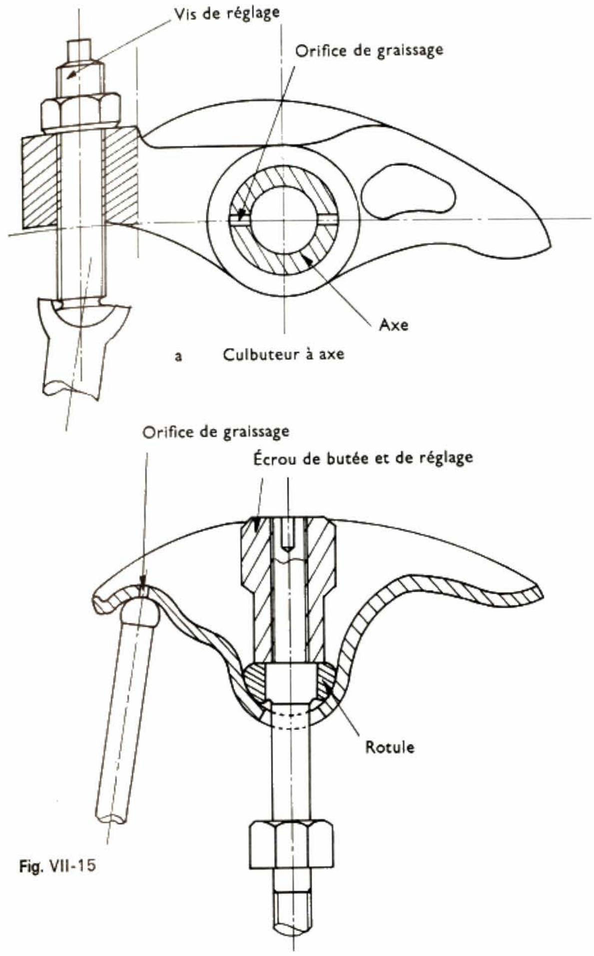


Fig. VII-15

b Culbuteur à rotule

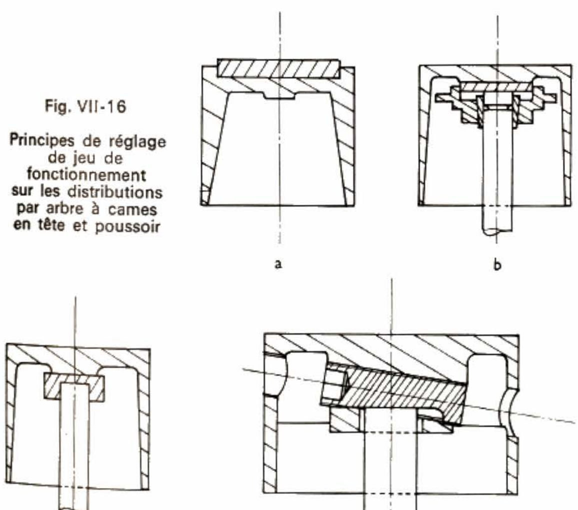


Fig. VII-16

Principes de réglage de jeu de fonctionnement sur les distributions par arbre à cames en tête et poussoir

contrainte maximale admissible. Cette contrainte τ est donnée par la relation suivante : $\tau = \dfrac{16\,FR}{\pi\, d^3}$ en appelant F l'effort maximal, R le rayon d'enroulement et d le diamètre du fil. Pour l'acier Oteva 60, par exemple, la contrainte maximale peut atteindre 6,5 kbar. L'écart de contrainte entre la levée nulle et la levée maximale de la soupape doit être compris entre 3 et 4 kbar. Un grenaillage du ressort à la bille d'acier de 0,20 mm améliore sa tenue en endurance. Il est parfois nécessaire d'augmenter le coefficient d'amortissement du ressort en raison des phénomènesde résonance dont il est le siège. On y parvient à l'aide des deux artifices suivants :

— adjonction de spires mortes à l'extrémité inférieure ;
— spires à pas variable, également à l'extrémité inférieure.

La butée supérieure du ressort est assurée par la coupelle clavetée sur la tige de soupape par deux demi-dés coniques. Le montage des demi-dés nécessite de bonnes qualités d'usinage des portées. Les coupelles peuvent être décolletées en acier mi-dur traité à 8 kbar ou obtenues par matriçage en acier XC 10 durci ou non par cyanuration. Il peut être nécessaire de prévoir des coupelles inférieures, en particulier sur les culasses en alliage léger.

Un bon centrage du ressort dans les coupelles supérieures et inférieures peut retarder l'affolement et améliorer la tenue en endurance à régime élevé.

Les soupapes. — La figure VII-17 représente le dessin d'une soupape et de ses différentes parties. Le dessin, en particulier celui de la collerette et de la tête, doit réaliser un compromis entre la résistance aux contraintes dynamiques et thermiques, le poids et l'aérodynamique des

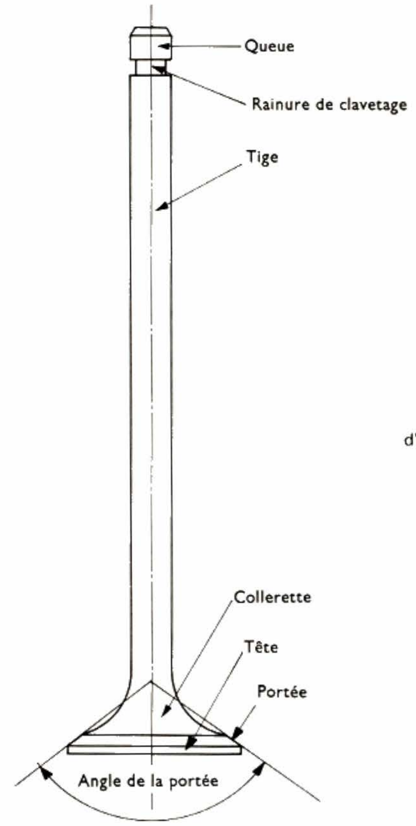


Fig. VII-17

Éléments d'une soupape

conduits d'admission et d'échappement. La soupape d'échappement est soumise à des conditions thermiques très dures durant la phase d'échappement des gaz brûlés, pendant laquelle la tête peut atteindre à pleine charge des températures voisines de 700 à 750 °C.

Les soupapes sont obtenues par matriçage ; l'angle de portée est égal à 90° ou à 120° et la queue est durcie par traitement haute fréquence. Sur les moteurs de compétition la tige est parfois chromée et la queue stellitée.

La soupape d'admission est généralement réalisée en acier légèrement allié traité pour obtenir une résistance de 80 kbar.

L'élaboration de la soupape d'échappement est beaucoup plus variée suivant les différents types de moteurs.

On distingue actuellement les conceptions suivantes :

— monométallique en acier type XB, X 20 T et 21.4 NS ;
— bimétallique à tige et tête soudées. Ce procédé permet d'utiliser une tête en acier austénitique et une tige en acier faiblement allié ;

— bimétallique par apport de métal sur la portée (alliages Brightray, 80/20, stellite).

Parmi les nombreux incidents rencontrés avec les soupapes, nous citerons le grillage de la portée et le gommage de la queue dans le guide. La rotation de la soupape en fonctionnement améliore la tenue de la portée (par un meilleur équilibre thermique) et l'élimination des dépôts de calamine (par rodage continu). Elle peut cependant entraîner une usure prématurée du siège si la fréquence de rotation est trop grande. Le gommage est en relation avec le graissage de la surface de frottement de la tige et du guide. Un manque d'huile entraîne une usure excessive et le grippage; un excès d'huile encrasse la collerette par carbonisation et conduit au coincement de la soupape dans le guide.

3.2. L'embiellage. — Nous examinerons successivement le piston et son axe, la segmentation, la bielle, le vilebrequin.

Le piston constitue la paroi mobile de la chambre de combustion; par l'intermédiaire de l'axe il supporte et transmet l'effort des gaz à la bielle puis au vilebrequin. En outre, il assure son propre guidage puisqu'il est articulé sur le pied de bielle. Pour satisfaire à ces fonctions, le piston doit avoir les qualités suivantes:

— une résistance suffisante, quelle que soit la température atteinte par la matière;

— une bonne conductibilité thermique de façon à évacuer suffisamment la chaleur vers les segments et la jupe;

— une déformabilité contrôlable et relativement faible sous l'action des variations de température en fonctionnement;

— une portée suffisante sur la paroi du cylindre de façon que le maintien du film d'huile ne soit pas compromis par des pressions de contact excessives;

— un poids minimal car le poids de la bielle et du vilebrequin, donc du moteur, en dépend en partie.

À l'heure actuelle les pistons sont réalisés en fonte, en acier et principalement en alliage léger (AS 12 UN). Ils sont généralement monoblocs, à l'exception de certains pistons composites de gros moteurs Diesel comportant une partie supérieure en fonte et un corps en alliage léger assemblés par vis ou par boulons.

Deux modes d'élaboration sont utilisés pour l'alliage léger: la coulée et le matriçage. Les pistons matricés ont une tenue en endurance supérieure en raison du fibrage qui en résulte.

Approximativement, les masses des pistons nus en fonction de leur alésage *D*, en exprimant les premières en grammes et les seconds en centimètres, sont données par les relations suivantes:

a) *Moteurs à allumage commandé:*

— en fonte 1,1 D^3;

— en alliage léger 0,8 D^3;

— pistons en alliage léger de moteurs de compétition: 0,7 D^3.

b) *Moteurs Diesel:*

— en fonte 2 D^3;

— en alliage léger 1,5 D^3.

La figure VII-18 a et b représente les coupes d'un piston de moteur à allumage commandé et d'un piston composite de moteur Diesel avec circuit de refroidissement à l'huile.

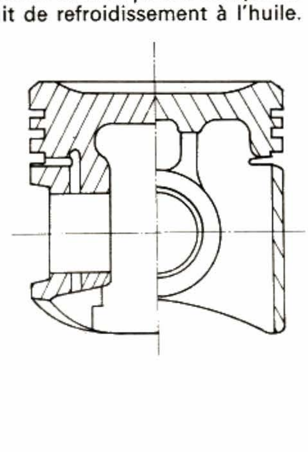


Fig. VII-18 a

Coupe à 90° d'un piston de moteur à allumage commandé

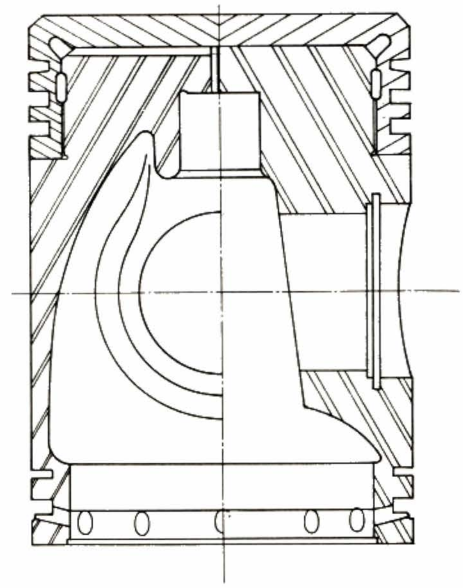


Fig. VII-18 b

Coupe à 90° d'un piston composite de moteur Diesel deux temps expérimental refroidi par circulation d'huile

Le piston comporte quatre parties: la tête, également appelée fond ou ciel, le porte-segments, les bossages supports d'axe, la jupe. La tête peut avoir des formes diverses selon la géométrie de la chambre de combustion. Sur les moteurs à rapport volumétrique élevé (diesels et moteurs de compétition), il est parfois nécessaire d'usiner des évidements pour permettre la levée des soupapes au voisinage du P.M.H. croisement. Pour des alésages compris entre 50 et 100 mm, l'épaisseur de la tête est de 2 à 3 mm pour l'acier, 3 à 4 mm pour la fonte et 4 à 7 mm pour l'alliage léger.

Le porte-segments reçoit les segments d'étanchéité aux gaz et le segment racleur. Dans les moteurs à allumage commandé on trouve deux ou trois segments d'étanchéité et un racleur alors que sur les diesels le piston est équipé de trois ou quatre segments d'étanchéité et d'un ou deux racleurs. La position du segment de feu a une grande importance car elle conditionne l'usure de la chemise et le gommage des segments. En règle générale, on doit faire en sorte que le segment de feu se situe à la limite de la zone mouillée par l'eau de refroidissement du cylindre lorsque le piston est au P.M.H.

L'épaisseur du cordon entre deux segments est fonction du matériau utilisé; il est courant de prendre une cote égale à l'épaisseur du segment pour l'alliage léger. La gorge du racleur comporte les orifices d'évacuation de l'huile situés, selon les cas, en fond de gorge, sous le segment racleur, ou à cheval sur le flanc inférieur et le fond de la gorge.

Ces orifices doivent être suffisants en section et en nombre pour permettre une bonne efficacité du racleur. Les fonds de gorge doivent être soigneusement rayonnés et les surfaces exemptes de défauts géométriques. En pratique on devrait s'abstenir de chanfreiner le bord extérieur des gorges d'étanchéité car l'action de ces chanfreins sur le débit de blow-by est très importante. Les bossages d'axe doivent être très rigides et reliés au fond de piston par des nervures. Lorsque l'axe est monté libre dans les bossages, il est parfois nécessaire de prévoir une alimentation en huile pour les portées. Cette alimentation peut être réalisée de différentes façons: en perçant un orifice reliant la gorge du racleur et le bossage (ce qui permet d'alimenter sous une légère pression) ou en ménageant un ou deux lamages dans le logement d'axe où les pressions de contact sont nulles. L'extrémité des bossages comporte une gorge dans laquelle on loge un circlips ou un jonc pour maintenir l'axe en position lorsqu'il est monté libre dans la bielle et le piston.

La jupe a pour rôle de guider le porte-segments et de répartir l'effort normal au cylindre dû à l'obliquité de la

bielle (V. chap. 6, § 1.3). La pression de contact projetée ne dépasse pas 4 kbar en général.

La hauteur de la jupe et sa position par rapport à l'axe géométrique de l'axe de piston ont une grande influence sur les pertes mécaniques par frottement.

En fonction de l'alésage D, la hauteur totale de la jupe h et la hauteur h_1 en dessous de l'axe ont en moyenne les valeurs suivantes :

Moteurs à allumage commandé : $h = 0{,}65\,D$, $h_1 = 0{,}4\,D$
Moteurs Diesel : $h = D$, $h_1 = 0{,}6\,D$

Le profil de jupe et les jeux de fonctionnement se déterminent expérimentalement compte tenu des diverses conditions de charge et du niveau sonore (claquements à froid). On réalise parfois un traitement de surface de la surface portante : oxydation anodique, dépôts électrolytiques d'étain ou de cadmium, dépôts de graphite ou de molybdène. Ces revêtements ont pour but de faciliter le rodage et l'accrochage du film d'huile.

En construction de grande série les pistons et les chemises sont appariés en diamètre, compte tenu du jeu des tolérances de fabrication. Selon les types de moteurs on trouve les trois dispositions pour l'axe de piston :

— Axe fixe dans les bossages et libre dans le pied de bielle.
— Axe fixe dans le pied de bielle et libre dans les bossages.
— Axe libre (ou montage flottant). C'est la solution qui offre le plus de sécurité du point de vue de la tenue mécanique. Elle est un peu plus compliquée en ce sens qu'elle nécessite des ajustements et des états de surface particuliers pour les parties frottantes, ainsi que l'utilisation de freins d'arrêt dont la mise au point peut poser des problèmes, compte tenu des poussées d'axe que l'on rencontre parfois sur ce type de montage.

Axe de piston. — Au point de vue de la résistance des matériaux l'axe de piston (fig. VII-19) peut être déterminé par une méthode simplifiée.

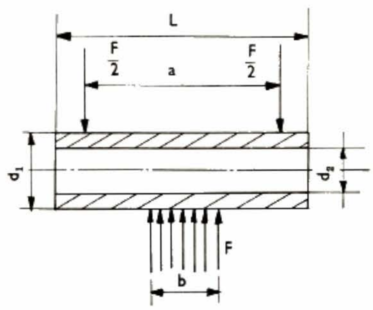


Fig. VII-19
Répartition des efforts dus à la pression des gaz sur l'axe du piston

Appelons :

p : la pression maximale des gaz dans le cylindre ;
D : le diamètre de l'alésage ;
a : la distance comprise entre les milieux des deux bossages ;
b : la longueur du pied de bielle (ou de la bague de pied de bielle) ;
E : le module d'élasticité du matériau ;
L : la longueur de l'axe ;
σ_1 : la contrainte de flexion ;
σ_2 : la contrainte résultant de l'ovalisation.

$$\sigma_1 = \frac{(2a - b)\, p\, D^2\, d_1}{100\,(d_1^4 - d_2^4)}$$

$$\sigma_2 = \frac{3\pi}{16} \cdot \frac{pD^2\,(d_1 + d_2)}{100 \,.\, L \,.\, (d_1 - d_2)^2}$$

Le degré de charge a pour valeur :

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$$

σ_R ne doit pas dépasser 3,5 à 5 kbar ;

La flèche maximale f et l'ovalisation sont respectivement égales à :

$$f = \frac{1}{60} \cdot \frac{p\,D^2\,a^2\,(2a - b)}{E\,(d_1^4 - d_2^4)} \qquad \delta = \frac{\pi}{320} \cdot \frac{pD^2\,(d_1 + d_2)^3}{EL\,(d_1 - d_2)^3}$$

Les pressions de contact projetées dans les bossages et dans la bague de pied de bielle ont respectivement pour valeur :

$$p_P = \frac{p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2}{d_1\,(L - b)}\,; \quad p_B = \frac{p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2}{d_1 \,.\, b}$$

La condition de graissage impose en pratique p_P voisin de 350 à 500 bars et p_B proche de 500 à 750 bars.

La figure VII-20 représente en coupe trois versions d'axe courantes : les versions b et c permettent un allégement sans compromettre la solidité. L'intérieur de l'axe doit être usiné sans trace d'outil susceptible de créer une amorce de rupture.

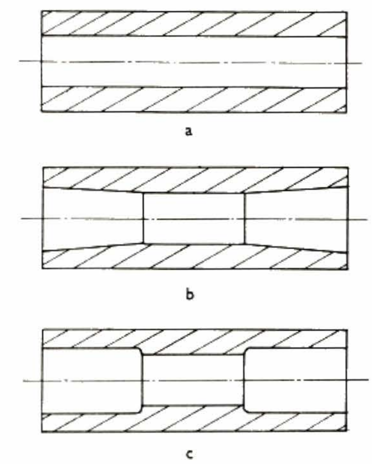


Fig. VII-20
Différentes formes d'axe de piston

Pour la fabrication on utilise des aciers doux de cémentation, des aciers au nickel ou nickel-chrome de cémentation, des aciers au carbone trempés superficiellement par chauffage en haute fréquence et dans certains cas des aciers de nitruration. Le montage en série des axes de piston est très délicat en raison des jeux initiaux et des variations des jeux en fonctionnement (elles peuvent entraîner des claquements). C'est pourquoi axes et pistons doivent être appariés avant assemblage.

Les segments. — Le rôle des segments (V. fig. VII-21) est d'assurer l'étanchéité de la chambre de combustion par rapport au carter du vilebrequin, de transmettre à la paroi du cylindre une partie de la chaleur évacuée par le piston et de régler la consommation d'huile du moteur. L'étanchéité doit être réalisée, d'une part, entre le segment et le cylindre et, d'autre part, entre le segment et le piston. La tension radiale nécessaire à l'étanchéité côté cylindre résulte de l'élasticité du segment et de la pression des gaz. La pression axiale est déterminée par la pression des gaz et par les forces d'inertie dues à la masse du segment et à l'accélération communiquée par le piston ; pour cette raison, au cours du cycle, la portée peut se faire sur le flanc inférieur ou sur le flanc supérieur de la gorge selon les conditions de fonctionnement. Les pressions de contact dues à l'élasticité dépendent des dimensions du segment, du jeu de coupe à l'état libre et du module d'élasticité du matériau employé ; la répartition des pressions peut être uniforme ou variable selon la forme initiale, la pression moyenne résultante atteignant 1,2 à 2,5 bars.

En ce qui concerne les segments racleurs d'huile, on a surtout cherché à réaliser des segments très flexibles conçus de façon à suivre les déformations du cylindre. La tension radiale est généralement obtenue par un ressort expandeur (V. fig. VII-21).

La hauteur des segments d'étanchéité varie de 0,02 D à 0,04 D selon les constructeurs, mais la tendance actuelle est plutôt aux faibles épaisseurs ; la hauteur des segments racleurs est en général de 1 à 1,5 mm, supérieure à celle des segments d'étanchéité.

La coupe peut être à recouvrement, en diagonale ou droite ; la coupe droite est maintenant utilisée dans la plupart des cas.

Sur certains moteurs à deux temps on ergote les segments pour éviter que la coupe vienne devant les lumières

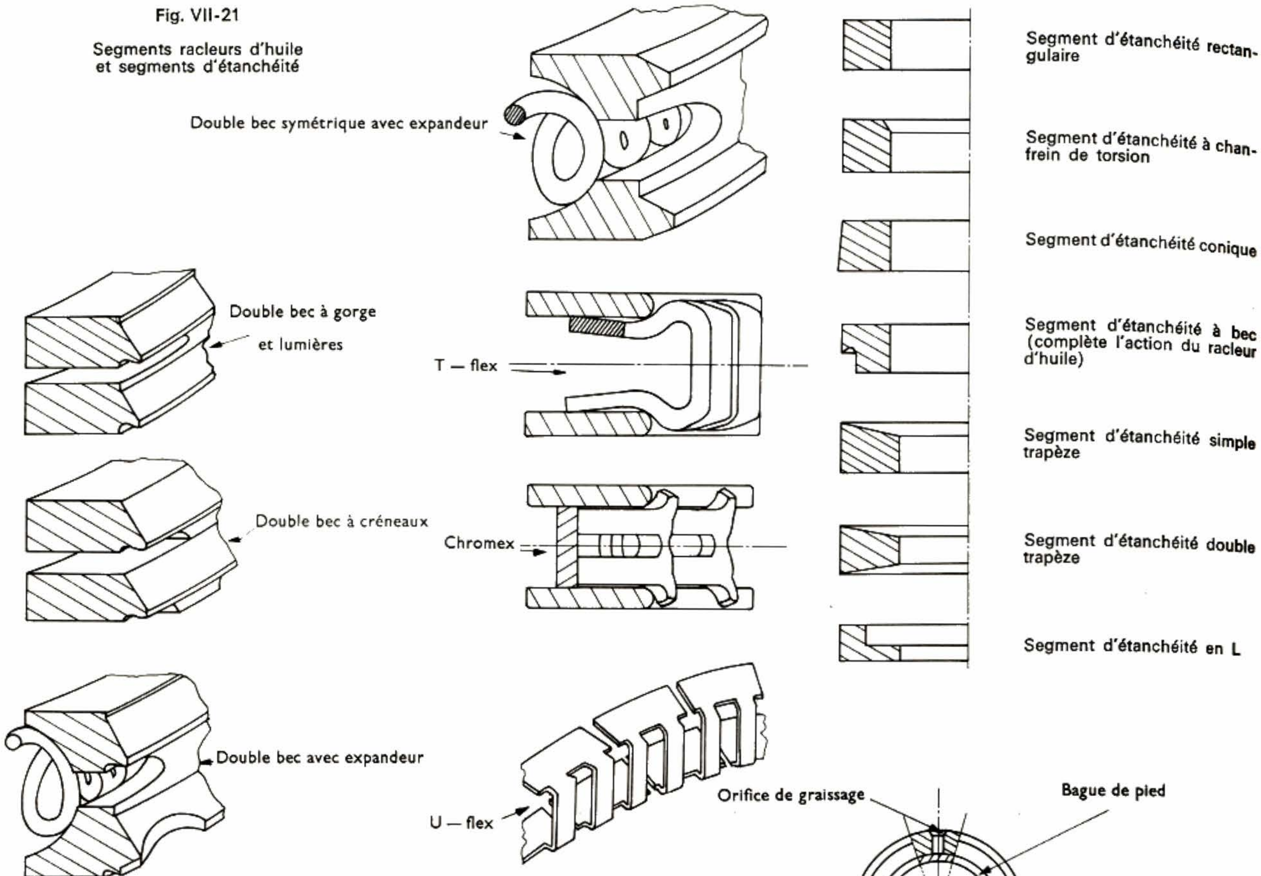


Fig. VII-21

Segments racleurs d'huile et segments d'étanchéité

en fonctionnement, et entraîne la rupture des becs en flexion alternée.

Le jeu de coupe se détermine expérimentalement de façon que les extrémités ne viennent pas en contact à chaud (ce qui occasionne la rupture ou le gommage). Un jeu de coupe excessif conduit évidemment à un défaut d'étanchéité et à l'augmentation du débit de blow-by. En pratique les jeux de coupe sont de quelques dixièmes de millimètre (4 à 5) pour des alésages inférieurs à 100 mm et le jeu de coupe du segment de feu est généralement un peu plus grand que celui des autres segments.

Les matériaux utilisés sont la fonte et quelquefois l'acier, plus particulièrement pour les racleurs. Pour diminuer l'usure du segment de feu, on procède au chromage de sa surface de frottement côté cylindre. L'action du chromage du segment de feu sur la réduction de l'usure du cylindre et des autres segments est également importante. La phosphatation, le cuivrage, le dépôt de molybdène sont des procédés parfois employés pour faciliter le rodage et éviter les traces de brûlures au cours des premières heures de fonctionnement.

La bielle est une pièce dont la définition et le dessin sont difficiles étant donné les impératifs de masse, de rigidité, de tenue en fatigue, d'encombrement, de graissage, etc., dont il faut tenir compte. La figure VII-22 représente une bielle en acier de moteur moderne à allumage commandé. Ses dimensions caractéristiques sont l'entraxe, le diamètre et la largeur du pied, le diamètre et la largeur de la tête. Une bielle équipée comporte généralement un coussinet de tête et une bague de pied lorsque l'axe est monté flottant. L'assemblage du chapeau avec le corps se fait par vis ou par boulons et le plan de joint est le plus souvent perpendiculaire à l'axe longitudinal ; dans certains cas on a recours au plan de joint incliné pour permettre à la tête de bielle de passer par le cylindre au montage ou pour diminuer l'encombrement de la mandoline (fig. VII-23 a et b). Le plan de joint incliné ne permet pas d'obtenir une tête de bielle suffisamment rigide, ce qui

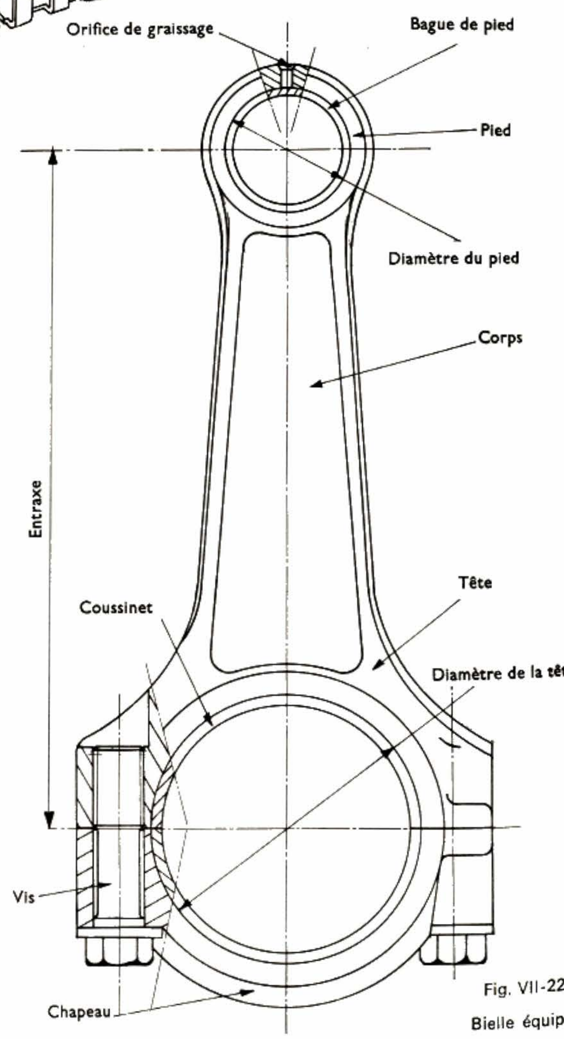


Fig. VII-22

Bielle équipée

Moteur Chrysler type 341

équipant les modèles 160 GT et 180 de Chrysler France

Vue extérieure

1. Pompe à essence
2. Carburateur double corps
3. Durite de circulation d'eau chaude (vers le carburateur)
4. Pompe de reprise (sur le carburateur)
5. Filtre à air à élément filtrant interchangeable
6. Reniflard et tuyauterie de récupération des vapeurs d'huile
7. Dispositif de recyclage des gaz
8. Couvercle des culbuteurs
9. Bouchon de remplissage d'huile
10. Allumeur
11. Correcteur d'avance à dépression (allumage)
12. Ventilateur
13. Courroie de ventilateur, pompe à eau, alternateur
14. Poulie de vilebrequin
15. Pompe à eau (refroidissement du moteur)
16. Durite retour de réchauffage du collecteur d'admission et du carburateur
17. Collecteur d'admission
18. Alternateur
19. Tendeur de courroie d'alternateur et de pompe à eau
20. Démarreur à solénoïde
21. Jauge de niveau d'huile dans le carter moteur
22. Prise de température d'huile moteur (thermocontact)
23. Filtre à huile moteur
24. Carter d'huile moteur

Attelage mobile

25. Piston
26. Segments
27. Axe de piston
28. Bielle
29. Chapeau de tête de bielle
30. **Vilebrequin à cinq paliers**
31. **Bloc cylindre cinq paliers en fonte spéciale à l'étain (alésage des cylindres : 87,7 mm)**
32. Chapeau de palier de vilebrequin
33. Coussinet de palier de vilebrequin
34. Volant moteur (de vilebrequin)
35. Couronne de démarreur

Distribution

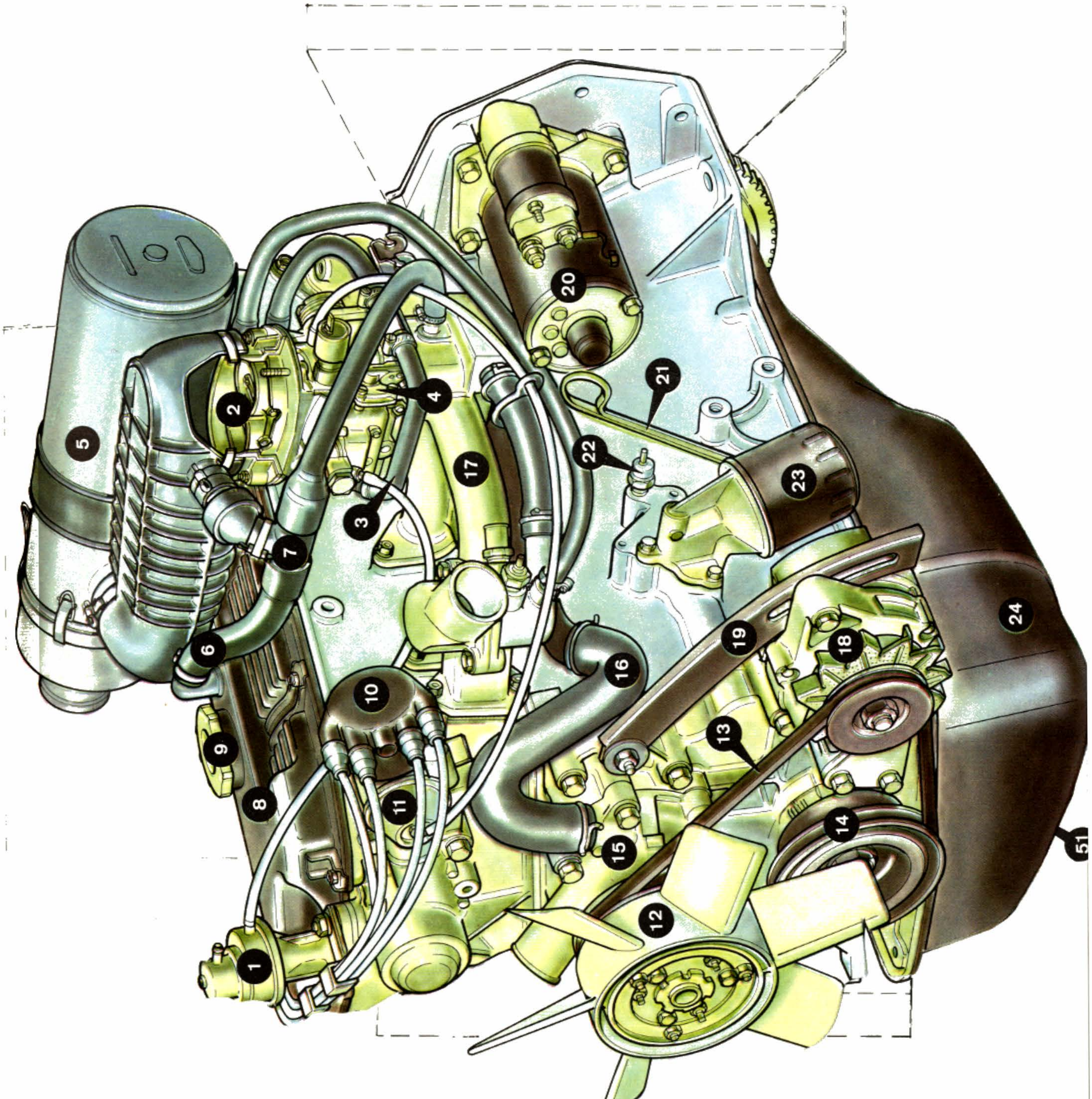
36. Pignon d'entrainement de chaine de distribution
37. Chaine double de distribution
38. Tendeur de chaine de distribution (à commande hydraulique)
39. Guide de chaine de distribution
40. Pignon sur arbre à cames en tête
41. Axes de support des culbuteurs
42. Culbuteur
43. Excentrique de commande de pompe à essence et pignon d'entrainement de l'allumeur
44. Soupapes (en tête)
45. Ressorts de soupapes
46. Culasse
47. Pignon d'entrainement de la pompe à huile
48. Pompe à huile de lubrification du moteur
49. Carter inférieur d'huile moteur

Graissage du moteur

50. Pignon d'entrainement de la pompe à huile
51. Pignon de la pompe à huile
52. Pompe à huile à engrenage
53. Carter inférieur d'huile (de quatre litres de capacité)
54. Jauge de niveau d'huile
55. Filtre à huile
56. Thermocontact (prise de température sur le circuit d'huile moteur pour le contrôle visuel sur le tableau de bord)
57. Graissage des paliers de support et des manetons de vilebrequin
58. Graissage des axes de support des culbuteurs et des paliers de *l'arbre à cames*
59. **Graissage et commande *hydraulique du tendeur de chaine de distribution***

Moteur Chrysler type 341

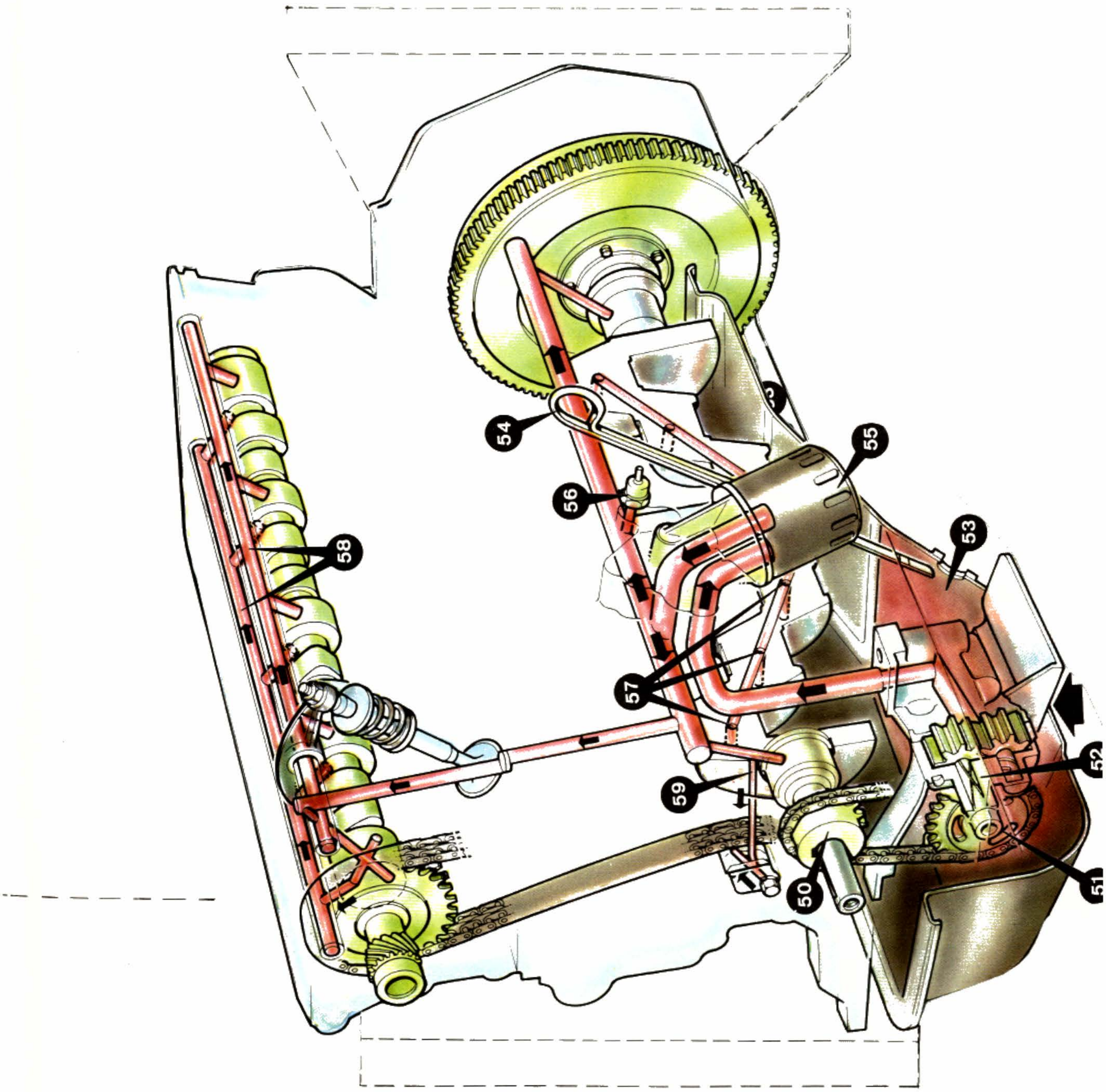
équipant les modèles 160 GT et 180 de Chrysler France



ARISTIDE QUILLET, Éditeur

Moteur Chrysler type 341

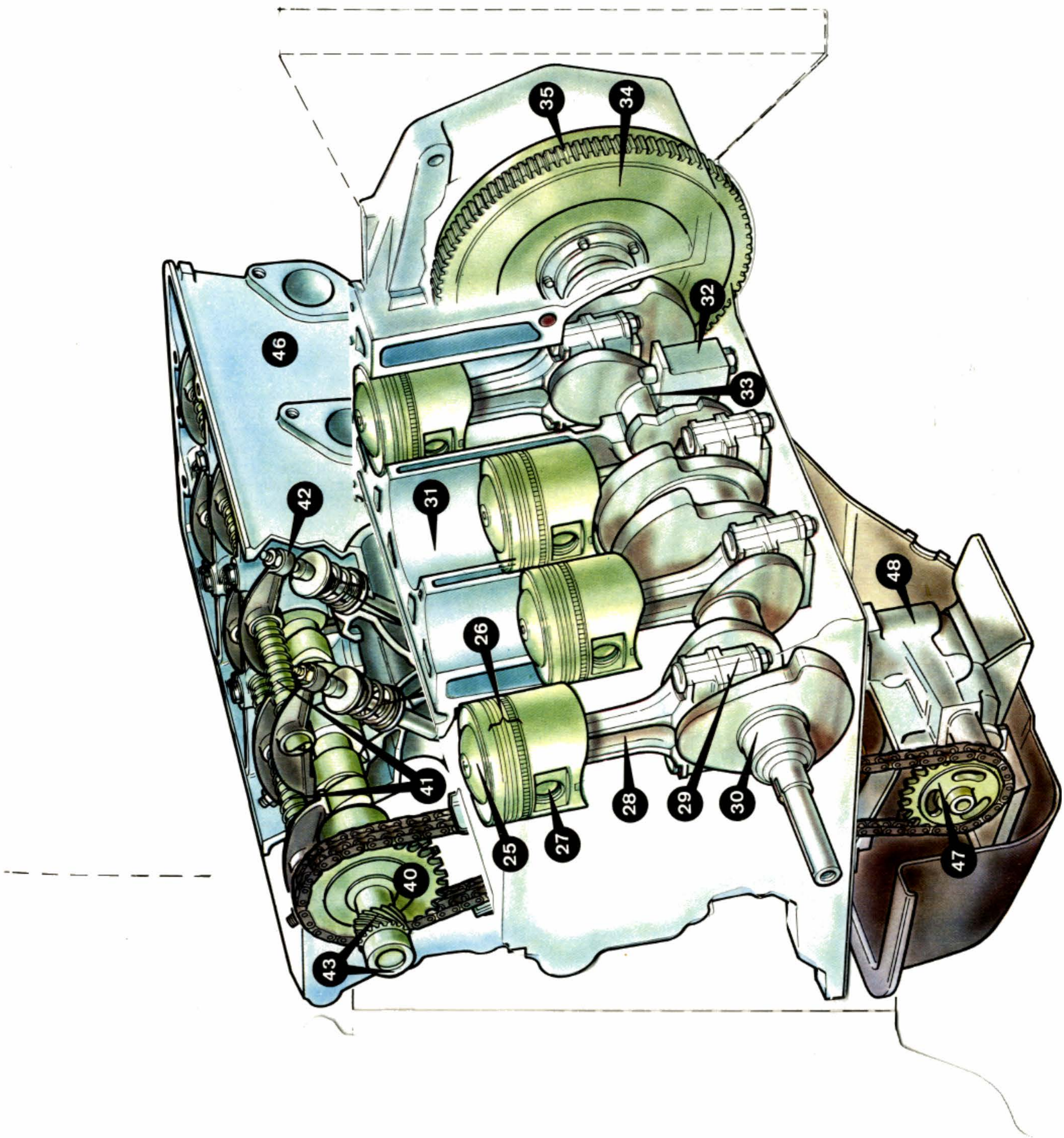
équipant les modèles 160 GT et 180 de Chrysler France



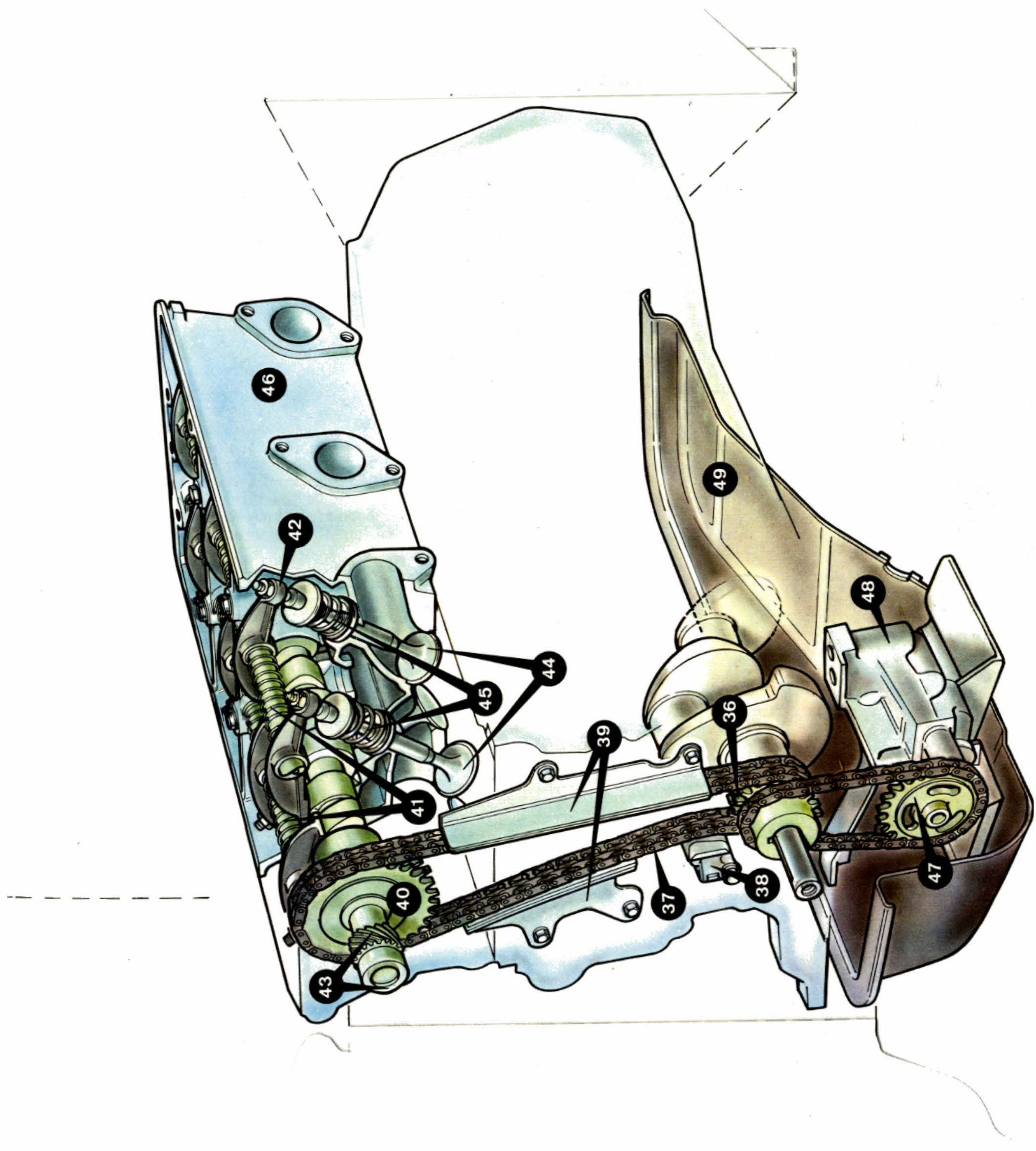
ARISTIDE QUILLET, Éditeur

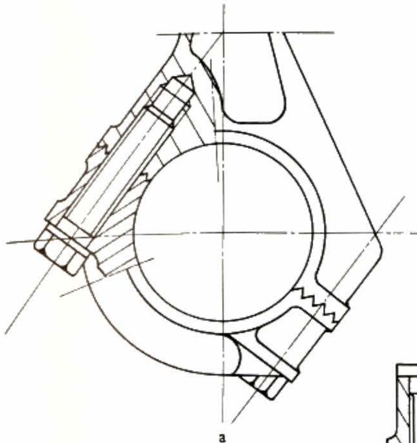
Moteur Chrysler type 341

équipant les modèles 160 GT et 180 de Chrysler France



ARISTIDE QUILLET, Éditeur


46
49
48
42
44
45
36
39
41
47
40
38
37
43



Coupe oblique

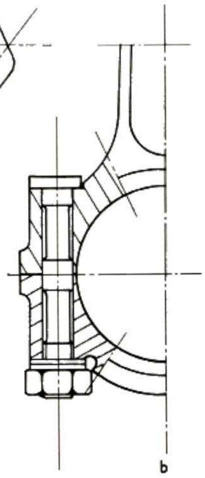


Fig. VII-23

Assemblage du chapeau de tête de bielle

Coupe droite

présente un inconvénient majeur principalement sur les moteurs à grande vitesse de rotation.

Sur certains gros moteurs Diesel en V on rencontre deux dispositions particulières : la bielle à fourche (fig. VII-24 a) et la bielle à œil avec bielle maîtresse et biellette (fig. VII-24 b). Sur les moteurs en V à allumage commandé les bielles sont généralement placées côte à côte par tranche de cylindres.



Fig. VII-24 a — Bielle à fourche

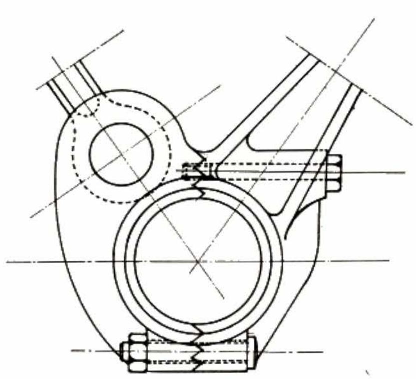


Fig. VII-24 b

Bielle à œil

Les matériaux utilisés pour la construction des bielles sont :

— Les aciers non alliés, aciers fins, à caractéristiques bien définies, pour traitement thermique (XC 38 f, traité pour obtenir une dureté HB de 207 à 241).

— Les aciers faiblement alliés (30 NCD 16, trempé à l'huile à 825-850 °C, revenu à 550 °C, pour obtenir les caractéristiques suivantes : E : 10,5 kbar, et R : 12 kbar).

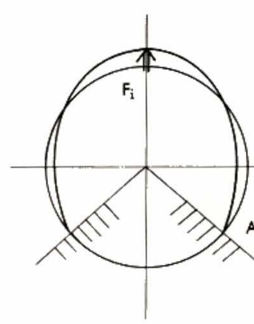
On a cherché également à utiliser les alliages d'aluminium (AU 4 SG, R : 4,6 kbar, E : 4 kbar) dans le but de réduire les masses en mouvement mais les résultats obtenus ont été décevants dans la plupart des cas.

Plus récemment le titane (TA 6 V, R = 10 à 11,5 kbar, E = 8,2 kbar) a été utilisé avec succès pour réaliser des bielles forgées de moteurs de compétition.

Au point de vue de la résistance des matériaux on dimensionne la section minimale du corps de bielle de façon qu'elle résiste en fatigue aux contraintes de compression et de traction et on vérifie la résistance au flambage. On considère en pratique les deux cas de fonctionnement suivant : pleine-charge à bas régime et régime maximal (forces d'inertie maximales et de signe contraire au P.M.H. croisement et au P.M.B. du piston). La charge limite de flambage F_f est donnée par la formule d'Euler : $F_f = \dfrac{\pi^2 . E . I.}{L^2}$

si E est le module d'élasticité, I le moment d'inertie de la section et L l'entraxe de la bielle. Pour des raisons de sécurité la force F_f doit être égale à au moins quatre fois la force maximale de compression due à la pression des gaz sur le piston.

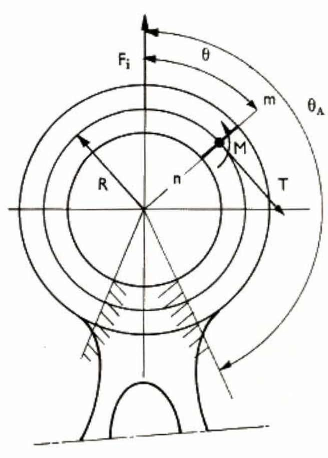
Le dimensionnement du pied de bielle tient compte du calcul des contraintes et des déformations qui doivent rester compatibles avec le maintien du film d'huile en fonctionnement. Pour le calcul des contraintes, nous supposerons que l'anneau composant le pied de bielle est encastré en A (fig. VII-25) et soumis à la force d'inertie F_i (due aux masses du piston équipé et de l'axe) qui se répartit dans une section quelconque mn en un moment de flexion M et un effort de traction ou de compression T.



Déformation du pied de bielle sous l'action de la force d'inertie due à la masse de piston équipé

Fig. VII-25

Calcul des contraintes dans le pied de bielle



Désignons par R le rayon du centre de gravité de la section, par $\frac{I}{v}$ son module d'inertie et par S sa section ; la force d'inertie F_i provoque, d'une part, des contraintes de flexion maximales sur les fibres intérieures et extérieures dont la valeur est donnée par la formule :

$$\tau_1 = \frac{M}{\frac{I}{v}} = \frac{F_i . K_1 . R}{\frac{I}{v}}$$

et, d'autre part, une contrainte de traction :

$$\tau_2 = \frac{T}{S} = \frac{F_i . K_2}{S}$$

Le degré de charge τ_R, ou la contrainte résultante, s'obtient en composant algébriquement τ_1 et τ_2 soit $\tau_R = \tau_1 + \tau_2$

Les valeurs des constantes K_1 et K_2 sont données dans les tableaux ci-après en fonction de l'angle d'une section quelconque θ et de l'angle d'encastrement θ_A.

θ	0°	30°	60°	90°	120°	135°	150°
$K_1 . 10^{-2}$ ($\theta_A = 120°$)	— 0,20	— 0,11	— 0,11	— 0,43	— 2,3		
$K_1 . 10^{-2}$ ($\theta_A = 135°$)	— 0,84	— 0,52	+ 0,33	+ 1,50	— 0,38	— 6,0	
$K_1 . 10^{-2}$ ($\theta_A = 150°$)	— 1,96	— 1, 29	— 0,53	+ 3,02	+ 2,44		— 10,81

$K_2 = 0{,}50$ excepté à l'encastrement où l'on prend :

θ_A	120°	135°	150°
K_2	0,48	0,43	0,37

La méthode qui précède s'applique également au calcul des contraintes dans la tête de bielle mais il faut alors tenir compte des contraintes supplémentaires dues au serrage du coussinet et à l'effort de traction résultant du couple de serrage des vis ou des boulons de bielle.

Le coussinet de tête de bielle doit être comprimé dans son logement de façon à éviter le battement ou sa rotation en fonctionnement quelles que soient les déformations de la tête de bielle ou les dilatations relatives sous l'action des variations et des écarts de températures. Cette nécessité conduit à dimensionner le coussinet en sorte que sa longueur développée soit légèrement supérieure à celle du logement. Le rôle des vis ou des boulons de bielle consiste à réaliser la compression du coussinet, à assurer l'assemblage du chapeau avec le corps de bielle en maintenant une pression suffisante aux plans de joint et à participer à la rigidité de la tête. Les *vis de bielle* sont généralement réalisées en acier faiblement allié (acier 30 NC 11 : *E*: 9 kbar, *R*: 12,5 kbar ; acier 30 NCD 16 : *E*: 11 kbar, *R*: 12,5 kbar). On a commencé à utiliser récemment l'acier Maraging pour réaliser des vis de bielle de moteur de compétition.

La force de traction maximale admissible dans une vis est donnée par la relation :

$$F = \frac{E}{\dfrac{4}{\pi d^2}\sqrt{1 + \left[\dfrac{4}{d}\left(\dfrac{f_1 d_1}{\cos \alpha} + \dfrac{p}{\pi}\right)\right]^2}}$$

Quant au couple de serrage correspondant il a pour valeur :

$$C = F\left[\frac{1}{2}\left(\frac{f_1 . d_1}{\cos \alpha} + \frac{p}{\pi}\right) + \frac{2}{3} f . \frac{R^3 - r^3}{R^2 - r^2}\right]$$

La figure IV-26 donne la signification des termes figurant dans ces expressions ; f et f_1 sont respectivement les coefficients de frottement sous la tête de vis et dans le filet. Pour un assemblage acier sur acier lubrifié à l'huile moteur leurs valeurs sont les suivantes : $f = f_1 = 0{,}12$ à 0,15.

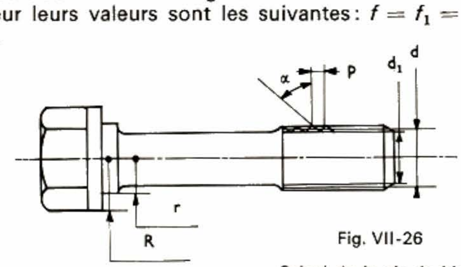


Fig. VII-26

Calcul de la vis de bielle

Pour des raisons de sécurité on détermine l'effort F en prenant une contrainte maximale de 15 à 20 % inférieure à la limite élastique E du matériau. Si F_i est l'effort d'inertie, dû à la masse de l'ensemble piston-axe-corps de bielle, calculé au P.M.H. croisement au régime maximal du moteur et appliqué à l'assemblage et si F_c est la force de serrage du coussinet dans son logement, on détermine la vis pour obtenir :

$$\frac{2F}{F_c + F_i} \geqslant 2$$

Le chapeau de bielle doit être positionné avec précision par rapport au corps de bielle. Cela est généralement réalisé par des pions de centrage disposés au plan de joint, par des bagues de centrage logées dans l'alésage des vis de bielle ou encore par les vis de bielles elles-mêmes.

La bague de pied de bielle peut être réalisée de différentes façons, mais la technique de la bague roulée comprenant un support acier et un antifriction s'est beaucoup développée ces dernières années sur les moteurs fabriqués en grande série. La composition de l'antifriction varie selon les charges appliquées en fonctionnement. En cas de charges importantes (250 à 500 bars) on utilise, par exemple, un bronze de composition suivante : cuivre 80 %, étain 10 %, plomb 10 % ou encore le mélange lead-bronze ou cupro-plomb.

Le coussinet de bielle est constitué de deux demi-coussinets composés d'un support acier et d'un antifriction. Les qualités que doit présenter un coussinet sont multiples : résistance mécanique, conformabilité, absorption des particules étrangères, résistance à la température, conductibilité thermique, etc. L'antifriction est constitué d'un alliage 80-10-10, d'un mélange cupro-plomb ou encore d'un mélange aluminium-étain. Les coussinets sont obtenus par coulée en coquille ou encore, et c'est le cas le plus fréquent en automobile, à partir d'une bande revêtue d'antifriction (coussinets minces de précision).

La détermination des dimensions du coussinet et le choix de l'antifriction se font en fonction des conditions d'utilisation que caractérisent plus particulièrement les pressions spécifiques projetées (calculées à partir du diagramme polaire des efforts sur le coussinet ; V. chap. 6, § 1.5) et les vitesses de glissement entre coussinet et maneton. Le rapport $\dfrac{\text{largeur}}{\text{diamètre}}$ du coussinet est généralement compris entre 0,4 et 0,6, et les pressions spécifiques admissibles dépendent de l'antifriction utilisé. À titre d'exemple le coussinet Clevitte 112 trimétal peut supporter des pressions de 850 bars dans certaines conditions.

L'arrêt en rotation du coussinet est surtout assuré par le serrage dans le logement comme nous l'avons vu précédemment ; en plus, chaque demi-coussinet possède à une de ses extrémités une languette venant se loger dans une saignée usinée dans la tête de bielle au niveau du plan de joint. Les languettes sont disposées d'un même côté, de façon à assurer l'arrêt en rotation dans les deux sens.

À proximité de la coupe les coussinets présentent une zone détalonnée appelée dépinçage destinée à éviter une réduction locale du jeu de fonctionnement sous l'effet du serrage.

Les conditions d'équilibrage dynamique d'un moteur polycylindre nécessitent que les bielles utilisées soient de même masse et que la répartition des masses entre tête et pied soit identique. À cet effet, on fait venir d'estampage des bossages, au pied et au chapeau de la tête de bielle, et ils sont usinés avant montage pour la mise à la masse ; parfois on obtient directement cette mise à la masse par détourage de la tête et du pied de bielle.

Le vilebrequin. — Dernier organe de l'équipage mobile, le vilebrequin transmet sous la forme d'un couple le travail produit par l'effort des gaz et le déplacement des pistons. Il est constitué de coudes (ou manivelles) en nombre égal au nombre de cylindres, excepté sur la plupart des moteurs à cylindres en V où l'on dispose généralement deux bielles par coude.

Chaque coude se compose de deux bras reliés par un maneton autour duquel tourne la tête de bielle ; deux coudes consécutifs peuvent être reliés ou non par un tourillon selon la disposition choisie. Par exemple, sur les vilebrequins de moteur à quatre cylindres en ligne il est de plus en plus fréquent de disposer un tourillon entre chaque coude. L'ensemble des manetons et des tourillons forme la ligne d'arbre.

Selon le nombre des cylindres, leur disposition, le mode d'équilibrage choisi et la forme du vilebrequin, la totalité des bras ou une partie seulement reçoit les contrepoids d'équilibrage des forces et des couples d'inertie (V. chap. 6, § 1.4 et 2). Les contrepoids sont venus de fonderie ou rapportés par vis.

Une extrémité du vilebrequin sert à la fixation du volant et transmet la puissance utile, l'autre extrémité sert de prise de puissance pour l'entraînement de la commande de soupapes et des accessoires. On trouve des dispositions où la puissance utile est prise au centre particulièrement sur des moteurs de compétition à nombre de cylindres élevés ; il arrive aussi que l'entraînement de la commande de soupapes se fasse côté volant, dans le but de réduire les variations cycliques du couple d'entraînement, sur certains moteurs Diesel. De telles applications restent cependant limitées pour des raisons de commodité et de prix de revient.

Le dessin d'un vilebrequin doit satisfaire trois exigences principales :

— la longueur totale est déterminée par l'entraxe et par le nombre de cylindres ;

— la largeur des portées doit présenter une surface projetée aussi grande que possible malgré le rapprochement des paliers ;

— la résistance aux sollicitations mécaniques en flexion et en torsion et la rigidité doivent être suffisantes pour éviter les inconvénients dus aux vitesses critiques (V. chap. 6 § 3).

La figure VII-27 représente une vue partielle d'un vilebrequin de moteur à quatre cylindres en ligne à cinq tourillons.

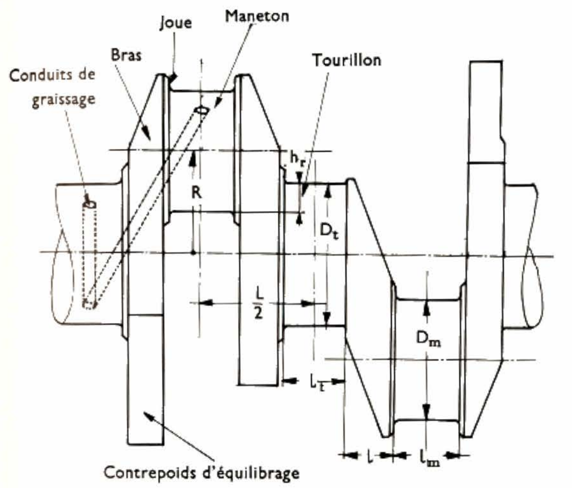


Fig. VII-27 — Vue partielle d'un vilebrequin de moteur à quatre cylindres en ligne

Sur les moteurs à allumage commandé, les principales grandeurs caractéristiques sont généralement comprises entre les valeurs suivantes :

D_m/D	l_m/D_m	D_t/D	l_t/D_t	l/D	L/D
0,55 à 0,65	0,55 à 0,65	0,65 à 0,75	0,45 à 0,55	0,20 à 0,30	1,15 à 1,25

D est le diamètre de l'alésage.

Aux extrémités du moteur il est nécessaire de prévoir des étanchéités à l'huile entre l'intérieur et l'extérieur du carter. Ces étanchéités sont de plus en plus fréquemment réalisées à l'aide de joints à lèvre fixés dans un logement du carter et frottant sur une portée usinée du vilebrequin (fig. VII-28 a). Le jeu latéral du vilebrequin est limité par deux demi-butées antifriction incluses dans un palier de ligne d'arbre du côté carter et frottant sur les joues d'un tourillon (fig. VII-28 b). Sur les moteurs à quatre cylindres en ligne les butées dites de latéral sont généralement placées sur le palier central. Elles sont arrêtées en rotation par le chapeau de palier.

Les matériaux et modes d'élaboration les plus couramment utilisés en automobile sont :

— l'acier forgé (par exemple, XC 38 f avec durcissement des portées par trempe H.F.) ;

— la fonte nodulaire coulée (solution qui semble se généraliser).

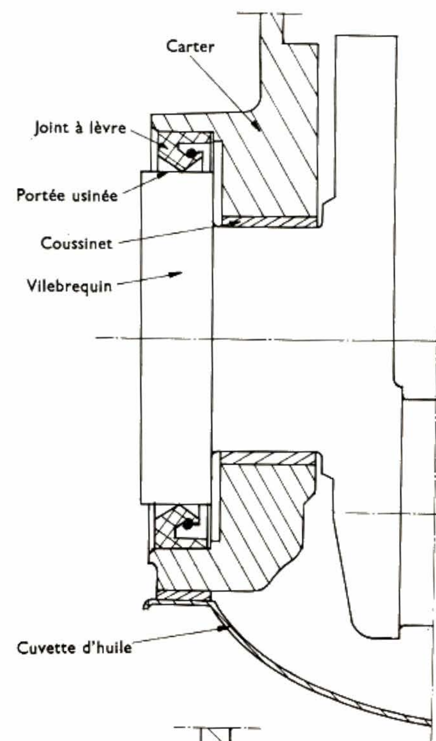


Fig. VII-28 a

Système d'étanchéité par joint à lèvre

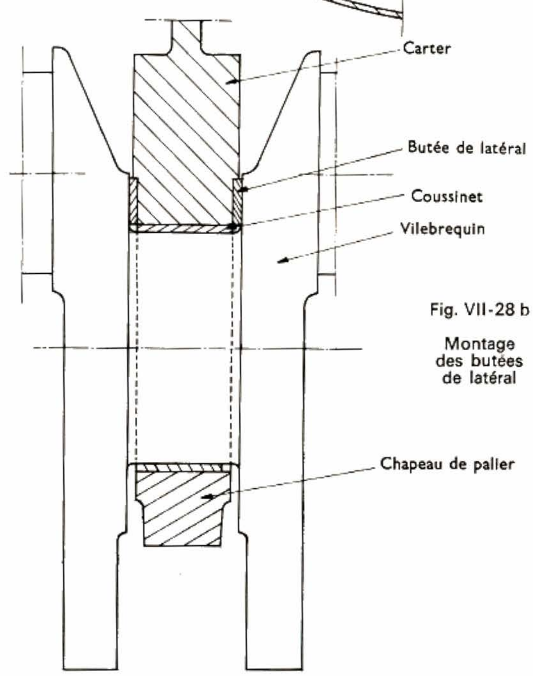


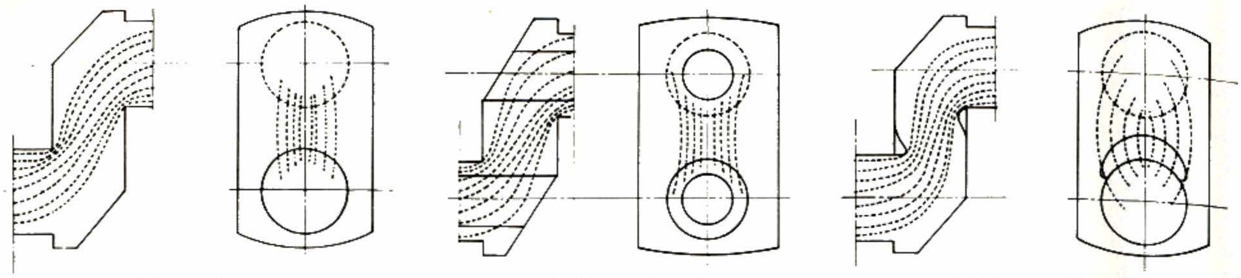
Fig. VII-28 b

Montage des butées de latéral

Pour certaines applications spéciales, comme les moteurs de compétition, par exemple, le vilebrequin peut être usiné entièrement dans un rondin forgé en acier de nitruration 30 CV 12, avec nitruration des portées. Cette solution est techniquement excellente car le traitement fait disparaître l'usure, évite les grippages et augmente la limite d'endurance à la fatigue dans des proportions importantes.

Les vilebrequins de moteurs Diesel sont généralement réalisés en acier forgé ou entièrement usinés à partir de rondins forgés (par exemple acier XC 45 et aciers alliés 30 NCD 11, 25 ou 35 NC 6, 25 CD 4). Selon les aciers utilisés, les traitements de surface sont la nitruration, la cémentation, la trempe superficielle après chauffage, soit au chalumeau, soit par traitement haute fréquence.

La réalisation de vilebrequins par assemblage est aussi pratiquée sur des moteurs où la disposition des cylindres permet une faible longueur totale (par exemple, monocylindre, deux et même quatre cylindres à plat en opposition).

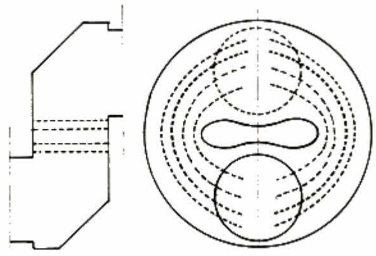


a) Vilebrequin normal
Forte concentration des tensions

b) Vilebrequin foré
Flux de force moins compact

c) Vilebrequin d'après Klose
Concentration des tensions réduite

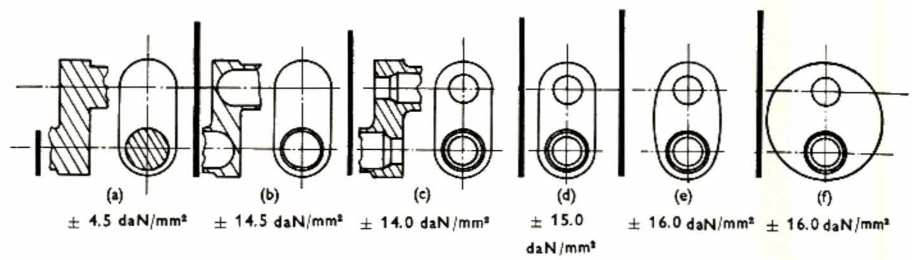
Fig. VII-29

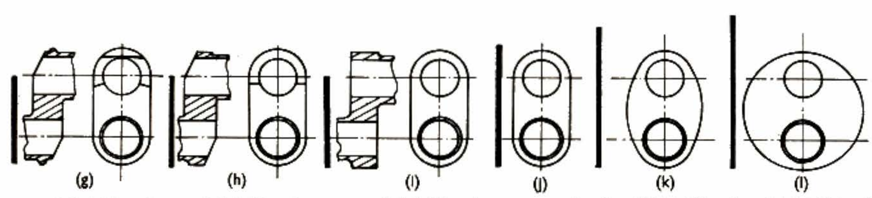


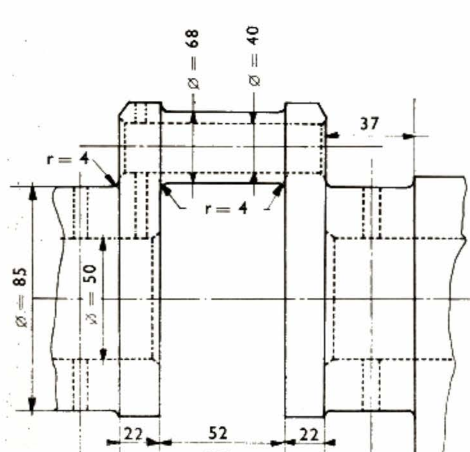
d) Vilebrequin d'après Frémont
Flux de force partagé et détourné

Fig. VII-30

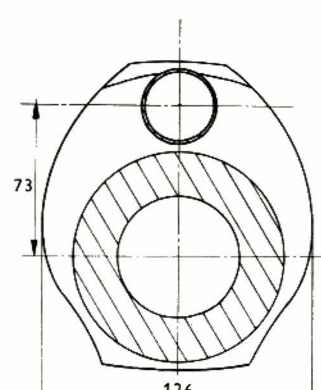
Résistance comparée
de différentes formes de coude
(*d'après Lurenbaum*)







a)



b)

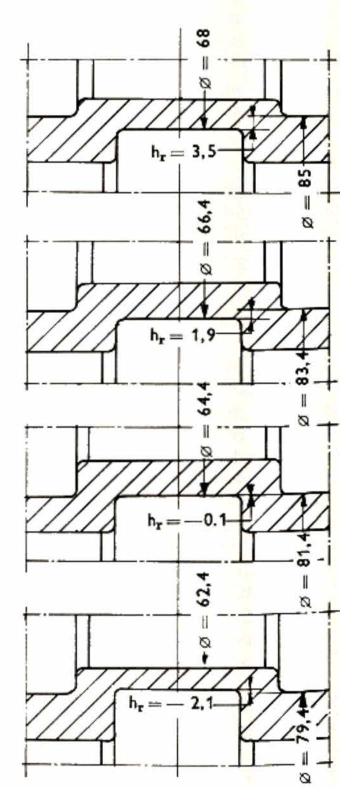
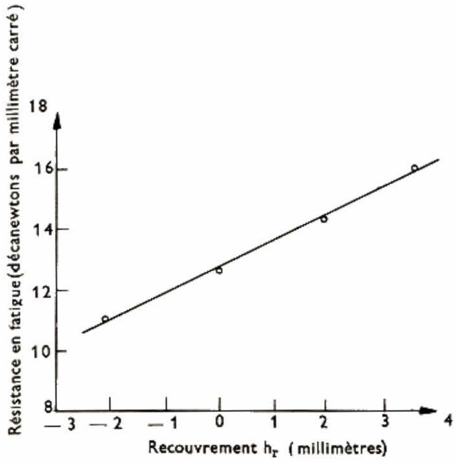


Fig. VII-31 a et b — Effet d'un recouvrement croissant sur la résistance en fatigue d'un vilebrequin (d'*après Williams et Brown*)

En ce qui concerne la résistance aux sollicitations mécaniques, les schémas de la figure VII-29 montrent que les efforts exercés par les bielles sur les manetons se transmettent aux tourillons par l'intermédiaire des bras et que le flux des forces est dévié deux fois à angle droit avec une forte concentration des lignes dans les zones de raccordement. Des essais comparatifs de résistance à la flexion et à la torsion alternées ont d'ailleurs été effectués par Lurenbaum en 1937 sur différents vilebrequins en grandeur nature et les résultats obtenus (fig. VII-30) confirment largement les remarques précédentes.

L'influence de la hauteur du raccordement h_r sur la tenue en endurance a été mise en évidence par Williams et Brown qui ont montré que le recouvrement augmente sensiblement la rigidité et la résistance en fatigue comme en témoignent les résultats de la figure VII-31. Les études sur la résistance des vilebrequins ont montré l'importance de certains détails tels que le rayonnage des congés de raccordement,

Fig. VII-31 c



l'état de surface des forages, la présence de filetage pour le bouchonnage, etc.

L'expérience montre malheureusement que l'importance de ces détails est fréquemment sous-estimée bien qu'ils soient généralement à l'origine des ruptures par fatigue. On remarque en particulier que ces ruptures ont le plus souvent leur origine au conduit de graissage et c'est la raison pour laquelle les arêtes de pénétration des perçages doivent être soigneusement rayonnées et de préférence polies. Bien qu'il soit généralement difficile de disposer de façon rationnelle les forages d'amenées d'huile des tourillons aux manetons, dans la mesure du possible, on s'efforce de les percer dans des zones peu chargées.

Nous avons noté précédemment que l'utilisation de vilebrequins coulés en fonte nodulaire était de plus en plus fréquente en automobile. Parmi les qualités que présente ce mode d'élaboration citons :

— Possibilités d'obtenir des formes rationnelles particulièrement en ce qui concerne le dessin des coudes (possibilités offertes par les techniques de fonderie).

— Faible sensibilité à l'effet d'entaille et haute faculté d'amortissement (propre de la fonte nodulaire) ainsi que possibilité d'obtenir une dureté et une résistance à l'usure élevées et de bonnes propriétés de glissement.

— Prix de revient réduit car l'exécution permet de diminuer la durée d'usinage et le nombre des opérations nécessaires, facteurs qui sont susceptibles d'influencer fortement les frais de fabrication.

À l'heure actuelle on arrive à donner aux vilebrequins en fonte coulée des qualités de résistance en fatigue qui surpassent celles de vilebrequins de construction courante en acier et peuvent même approcher celles de vilebrequins soigneusement étudiés et réalisés en acier de résistance moyenne.

Du point de vue de la résistance des matériaux, le calcul d'un vilebrequin ne peut être effectué avec une certaine exactitude que dans le cas d'un vilebrequin reposant sur deux paliers, c'est-à-dire dans le cas du monocylindre ou de certains petits moteurs bicylindres en ligne ou à cylindres opposés. On peut se reporter dans ce cas précis, pour la détermination des efforts, aux formules développées dans l'étude de l'équilibre de la manivelle (V. chap. 6 § 1.3). Au-delà de deux paliers le système est hyperstatique et la détermination des efforts ne peut se faire qu'en assimilant le vilebrequin à une poutre reposant sur plusieurs appuis et compte tenu d'hypothèses restrictives nécessaires à l'obtention de calculs accessibles. En fait le vilebrequin est soumis à des efforts de flexion et de torsion entraînant, en fonctionnement normal, des contraintes généralement acceptables et ce sont dans la plupart des cas les phénomènes de vibration de torsion et de flexion qui entraînent la rupture. Comme la détermination des contraintes aux régimes critiques n'est pratiquement pas possible en cours d'étude, en raison du manque de renseignements concernant la valeur du taux d'amortissement, la portée des calculs de résistance des matériaux relatifs au vilebrequin semble très limitée ; ces calculs ne peuvent pas, en tout cas, se substituer entièrement à l'expérience dans l'établissement d'un nouveau projet.

Le volant. — Le choix du coefficient d'irrégularité cyclique (V. chap. 6 § 1.7) définit le moment d'inertie polaire du volant, c'est-à-dire son diamètre extérieur. Mais le rôle du volant ne se limite pas à assurer la régularité de la vitesse angulaire de rotation du vilebrequin : il comporte aussi la couronne de démarreur (et participe donc au lancement du moteur) et il transmet la puissance par accouplement fixe ou débrayable à l'organe récepteur. Sur les moteurs de traction, par exemple, le volant supporte généralement le système d'embrayage.

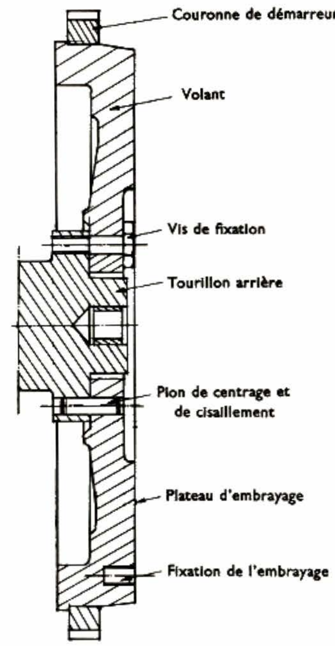


Fig. VII-32

Schéma d'assemblage du volant sur le vilebrequin

Dans la plupart des cas il est assemblé au vilebrequin par des vis multiples et des pions de cisaillement. On trouve également des assemblages par boulons, par vis centrale ou encore par cône. Le volant est couramment réalisé en fonte et quelquefois en acier. Du point de vue de la résistance des matériaux, on vérifie que les contraintes de traction à la périphérie ne dépassent pas la valeur admissible au régime maximal de rotation. Si R est le rayon extérieur de la jante du volant, ρ la masse volumique du matériau et ω la vitesse angulaire de rotation, la contrainte ν est donnée par la relation : $\nu = \rho\omega^2R^2$ (en fonction de la vitesse tangentielle $V = \omega R$: $\nu = \rho V^2$). La figure VII-32 représente le volant équipé, d'un moteur de série quatre cylindres, assemblé au vilebrequin.

CHAPITRE VIII

LE GRAISSAGE

1. NÉCESSITÉ DU GRAISSAGE

Les pertes d'énergie, traduites par le rendement mécanique du moteur, proviennent pour une part des chocs (dus à l'existence de jeux de fonctionnement et aux changements de portage des pièces en contact) ainsi que des vibrations engendrées par les variations périodiques des efforts. Elles résultent aussi et surtout des frottements qui se produisent au cours du déplacement des éléments en mouvement.

Dans un moteur les frottements peuvent être décomposés de la façon suivante :

— Frottements internes des pièces déformables sous l'action des efforts qui leur sont appliqués.

— Frottements internes des fluides en évolution (en raison de leur viscosité).

— Frottements entre parties mobiles en mouvement relatif avec interposition d'un lubrifiant.

Le frottement entre parties mobiles se présente sous différentes formes. Si les parties frottent directement l'une sur l'autre le frottement est très important : on est en présence du *frottement immédiat* ou *frottement sec.* Sous cette forme il n'est jamais admis entre pièces glissant l'une par rapport à l'autre dans un moteur. En interposant certains liquides entre les deux parties mobiles, le frottement peut être considérablement réduit par l'action de lubrification qui en résulte. On obtient alors le *frottement médiat.*

Sans entrer dans le détail de la théorie du frottement médiat il convient cependant de distinguer les deux régimes suivants :

— *Frottement fluide :* le frottement fluide résulte de la possibilité d'existence d'une couche fluide relativement épaisse entre deux surfaces en déplacement relatif de translation, à la seule condition que ces surfaces soient inclinées l'une par rapport à l'autre (formation d'un coin d'huile). C'est par exemple le cas des paliers de ligne d'arbre et d'arbre à cames où l'existence du jeu entre arbre et coussinet permet la formation d'un coin d'huile en raison du déplacement des centres. Dans ce cas le frottement est appelé *frottement hydrodynamique.*

— *Frottement semi-fluide :* cet autre mode de frottement médiat apparaît lorsque la couche fluide est éliminée entre les deux surfaces en déplacement. Ce sont alors deux pellicules adhérentes qui frottent l'une sur l'autre : ce frottement est dit *onctueux.*

Ces deux régimes ne s'excluent d'ailleurs pas ; en particulier, dans le cas des paliers, le frottement onctueux précède toujours le frottement hydrodynamique en s'opposant au grippage des organes en mouvement tant que les conditions de vitesse tangentielle qui permettent la formation d'un coin d'huile ne sont pas réalisées.

Le rôle du graissage consiste donc à assurer la lubrification des surfaces en mouvement relatif ; il est nécessaire au bon fonctionnement et à la longévité du moteur en même temps qu'il réduit les pertes d'énergie par frottement à leur valeur minimale. Un autre rôle lui est également attribué : il s'agit du transfert d'une partie de la chaleur dégagée par la combustion.

2. SCHÉMAS DES PRINCIPAUX SYSTÈMES DE LUBRIFICATION

Le graissage des moteurs modernes se fait essentiellement par circulation d'huile sous pression, par écoulement sous l'action de la pesanteur et par projection. La circulation sous pression est assurée par une pompe débitant dans un circuit composé de plusieurs éléments tels que clapet de régulation de pression, filtre, canaux de liaisons entre les différents organes à lubrifier, etc. Parmi les organes graissés sous pression on trouve en principe :

— les paliers de ligne d'arbre (tourillons et manetons) ;

— les paliers d'arbre à cames ;

— la rampe de culbuteurs (sur les moteurs à arbre à cames latéral).

Les soupapes, les poussoirs, les engrenages de distribution, les cames, les cylindres, les pistons, etc., sont lubrifiés par écoulement ou par projection.

Il existe différentes dispositions de circuit de graissage parmi lesquelles on distingue les deux suivantes qui sont les plus courantes :

— Circuit sous pression à carter humide dont l'application est pratiquement généralisée sur les moteurs d'automobile de série ainsi que sur les moteurs Diesel de faible et moyenne puissance.

— Circuit sous pression à carter sec dont l'application est réservée aux moteurs Diesel de puissance spécifique élevée et aux moteurs de compétition.

Le schéma de la figure VIII-1 représente un circuit à carter humide de moteur d'automobile à arbre à cames en tête, quatre cylindres, vilebrequin à cinq paliers. Nous allons décrire comment est obtenue la circulation d'huile. Une pompe volumétrique, entraînée à un régime de rotation proportionnel à celui du moteur, aspire l'huile contenue dans un réservoir, couramment appelé « cuvette d'huile » ; il est assemblé de façon étanche au carter du vilebrequin. L'aspiration se fait par l'intermédiaire d'une conduite et d'une crépine immergée chargée d'assurer l'alimentation en huile et la protection de la pompe quelles que soient les conditions d'utilisation du moteur. La pompe débite dans une galerie principale (venue de fonderie dans le carter bloc cylindre) à partir de laquelle l'huile est répartie entre les différents points à lubrifier. Un clapet de régulation de pression, branché en dérivation entre l'aval et l'amont de la pompe, limite la pression à une valeur acceptable particulièrement au démarrage à froid.

Un filtre, alimenté en série dans l'exemple considéré, assure la filtration de l'huile entre la pompe et la galerie principale. L'alimentation des cinq tourillons de vilebrequin est assurée par des canaux venus de fonderie débou-

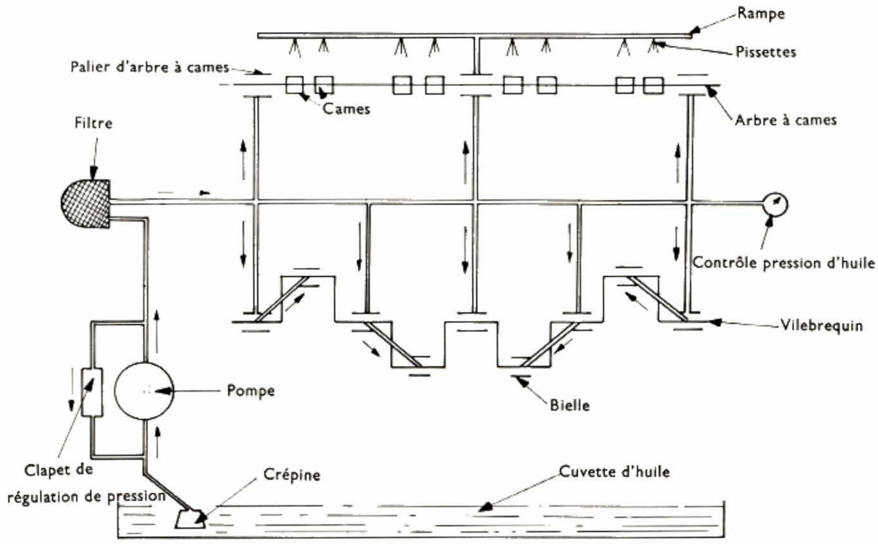


Fig. VIII-1
Schéma du circuit de graissage à carter humide d'un moteur quatre cylindres simple A.C.T.

chant dans la galerie. Une partie de l'huile est ensuite envoyée aux manetons par des forages percés dans le vilebrequin. Le transfert de l'huile du carter aux tourillons se fait par l'intermédiaire des coussinets qui comportent à cet effet des rainures dans lesquelles débouchent les canaux d'amenée.

L'alimentation en huile des paliers d'arbre à cames est obtenue par des canalisations branchées sur la galerie principale. Le graissage des cames est réalisé à l'aide d'une rampe comportant des injecteurs alimentée à partir du palier central de l'arbre à cames. Un manomètre branché en bout de la galerie principale permet de contrôler la valeur de la pression d'huile.

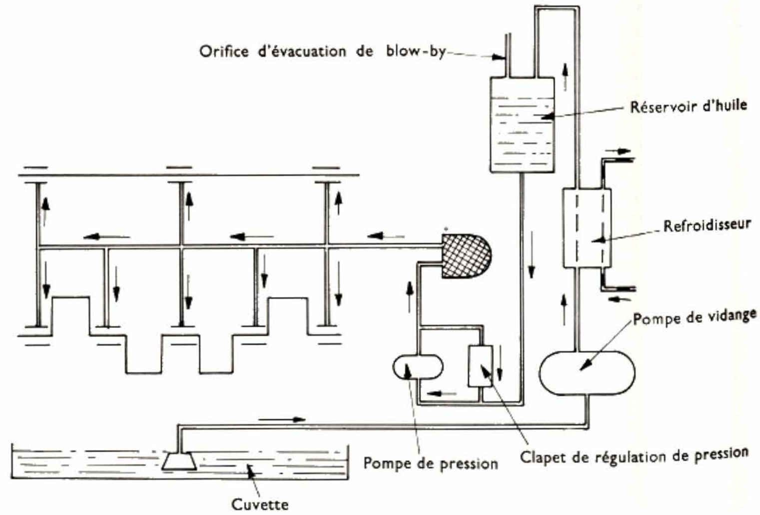
Cette disposition nécessite que le niveau d'huile dans la cuvette soit maintenu à une valeur comprise entre deux limites maximale et minimale fixées par le constructeur. Un niveau trop faible peut provoquer le désamorçage de la pompe et, en plus, il augmente la fréquence de rotation de l'huile à travers le circuit. Au contraire, un niveau excessif peut entraîner le barbotage du vilebrequin, d'où une perte de puissance suivie d'une augmentation de la température de l'huile et le risque de formation d'émulsion néfaste à la tenue des coussinets de paliers.

Le schéma de la figure VIII-2 représente un circuit d'huile sous pression à carter sec, sur lequel on retrouvera sans difficulté les éléments du circuit sous pression de la disposition précédente, en plus des éléments propres à ce second système de lubrification.

Dans cette disposition une pompe de vidange est utilisée pour vider en permanence la cuvette, qui ne constitue plus la réserve d'huile, et pour refouler l'huile, au travers d'un refroidisseur, dans un réservoir faisant éventuellement office de dégazeur.

L'extraction de l'huile du carter pose un certain nombre de difficultés qui, dans la mesure où elles sont mal résolues, peuvent entraîner des consommations d'huile exagérées, une perte de puissance, un échauffement d'huile anormal et le phénomène de moussage préjudiciable au graissage du moteur. On peut dire qu'actuellement, malgré les travaux de mise au point effectués dans ce domaine sur les moteurs à pistons d'aviation, les défauts de vidange des moteurs de compétition sont dans bien des cas dus à un manque de puissance effective (qui se retrouve généralement dans l'encombrement des refroidisseurs d'huile). Ces difficultés proviennent du fait que dans la plupart des cas on compte sur l'action de la pesanteur pour rassembler l'huile dans la cuvette, alors que de nombreuses autres forces, résultant de l'accélération des pièces en mouvement et du mouvement du véhicule, peuvent avoir une action non négligeable sur les concentrations d'huile dans le carter. Par ailleurs, on doit tenir compte du fait que l'huile qui sort des paliers se trouve plus ou moins émulsionnée, ce qui entraîne une augmentation de son volume massique à l'admission de la pompe de vidange. De plus, un volume de gaz de blow-by, dont la valeur dépend de l'étanchéité de la segmentation, s'ajoute aux gaz aspirés. Pour ces raisons le débit volumétrique de la pompe de vidange doit être deux à quatre fois plus grand que celui de la pompe de

Fig. VIII-2
Schéma d'un circuit de graissage à carter sec



pression selon l'agencement des prises de récupération. On trouve d'ailleurs des dispositions où une pompe aspirant en majeure partie des gaz de blow-by est ajoutée à la pompe de vidange.

3. DESCRIPTION DES ÉLÉMENTS D'UN CIRCUIT DE GRAISSAGE

Nous examinerons successivement : les canalisations, les pompes, les clapets de régulation de pression, les dispositifs de filtration d'huile et ceux de refroidissement.

3.1. Les canalisations. — Selon les moteurs le débit d'huile est compris entre 10 et 20 litres par cheval et par heure (13 à 26 l/kWh). Dans les canalisations sous pression on peut admettre une vitesse d'écoulement de 5 à 10 m/s mais celle-ci doit être limitée à 1 ou 2 m/s à l'aspiration, de manière que la pression statique n'atteigne pas dans une zone où l'écoulement est accéléré (coude, réduction locale de section, etc.) une valeur égale à la tension de vapeur de l'huile plus ou moins émulsionnée. Ce phénomène peut, en effet, provoquer la cavitation de la pompe avec tous les inconvénients que cela comporte. Les canalisations venues de fonderie ou par perçage sont préférables aux conduites rapportées pour des raisons de sécurité (rupture par vibration, fuites). Les canalisations externes de liaison sont généralement du type souple et sont prévues pour résister à la pression et aux températures élevées. Il ne faut pas perdre de vue que l'utilisation d'un raccord de branchement mal fait peut entraîner une perte de charge locale prohibitive à l'aspiration d'une pompe. Dans le cas d'une lubrification par injecteur (ou pissette) on tiendra compte du fait qu'un orifice de diamètre inférieur à 1 mm est délicat à percer et peut facilement s'obturer en fonctionnement.

3.2. Les pompes de pression et de vidange. — Les deux types de pompe le plus couramment utilisés sont :

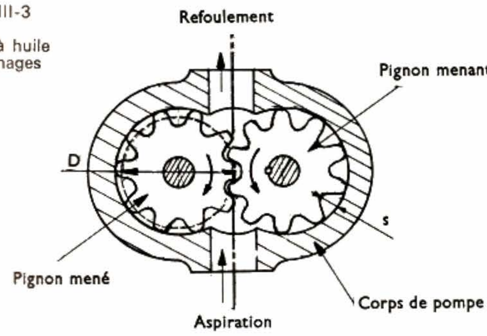
— les pompes à engrenages ;

— les pompes à engrenages intérieurs ou pompes à rotor (licence Hobourn Eaton).

La figure VIII-3 représente la coupe d'une pompe à engrenages. Elle se compose de deux pignons à denture droite (ou hélicoïdale) disposés dans un carter muni d'un orifice d'aspiration et de refoulement. Un des deux pignons est

Fig. VIII-3

Pompe à huile à engrenages



commandé de l'extérieur et entraîne le second par engrènement. Au cours du mouvement, l'huile est transférée de l'aspiration au refoulement, enfermée entre les creux de denture et le corps de pompe.

Désignons par :

N : la fréquence de rotation des pignons (en tours par minute) ;

D : le diamètre primitif des pignons (en millimètres) ;

s : la saillie (en millimètres) ;

L : la largeur de la denture (en millimètres).

Le débit volumétrique théorique Q de la pompe (en litres par minute) est donné par la relation pratique suivante applicable à des pignons à denture droite (d'après G. Henriot) :

$$Q = 2\pi N\,D s\,L\,.\,10^{-6}$$

Le débit réel dépend évidemment du rendement volumétrique dont la valeur est d'autant plus grande que les jeux de fonctionnement entre l'extrémité de la denture et l'alésage du carter et surtout entre les faces des pignons et le carter sont réduits. Le rendement volumétrique dépend également de la viscosité de l'huile, dont les variations sont importantes en fonction de la température de l'huile, de la température de la pompe, de la fréquence de rotation de la pompe et de la pression de refoulement. Pour les pompes refoulant à une pression ne dépassant pas 10 bars on peut choisir un rendement volumétrique η_v de 0,90 à condition que la canalisation d'aspiration soit correctement définie.

Si η_g est le rendement global de la pompe (produit du rendement mécanique et du rendement volumétrique) et si Δp est l'écart de pression admission-refoulement, la puissance W absorbée est donnée par la formule suivante :

$$W = \frac{Q}{\eta_g}\,.\,\Delta p$$

soit, en exprimant Q en litres par minute, Δp en bars et W en chevaux (1 ch = 736 W).

$$W = \frac{1}{450}\,.\,\frac{Q\,.\,\Delta p}{\eta_g}$$

La figure VIII-4 représente la coupe d'une pompe à engrenages intérieurs dont l'emploi convient particulièrement pour les forts débits et les pressions faibles, ce qui est généralement une caractéristique des pompes de vidange. Ce

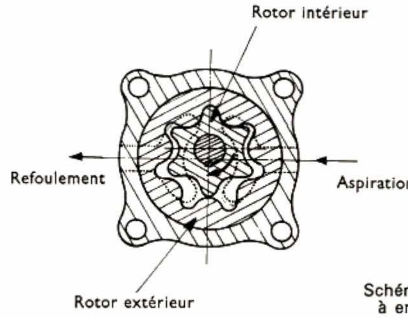


Fig. VIII-4

Schéma de pompe à huile à engrenages intérieurs

type de pompe se compose de deux rotors excentrés tournant dans un carter muni d'orifices d'aspiration et de refoulement sur le flanc d'une de ses extrémités. Le rotor extérieur comporte n logements dans lesquels engrènent les n-1 lobes du rotor intérieur entraîné par un arbre de commande. L'huile est transférée de l'aspiration au refoulement, enfermée dans l'espace compris entre lobes et logements.

Le débit volumétrique théorique atteint les valeurs suivantes pour des pompes Eaton du type C, CD et D par centimètre de longueur de rotor et pour une fréquence de rotation de 1 000 tr/mn.

Type	C	CD	D
Diamètre du rotor extérieur en millimètres	40,7	49,3	57
Débit en litres par minute . . .	4,25	6	7,77

Il convient évidemment de multiplier ces valeurs par un rendement volumétrique qui peut être choisi égal à 0,8 en première approximation pour obtenir la valeur du débit réel. On peut dire que le rendement volumétrique de ce type de pompe est influencé par les mêmes paramètres que ceux indiqués à propos des pompes à engrenages. Notons cependant que ce rendement peut être élevé à condition d'assurer une admission d'huile parallèle à l'axe des rotors.

3.3. Clapets limiteurs de pression. — Aux variations de rendement volumétrique près, nous avons vu que le débit d'une pompe volumétrique est proportionnel à sa vitesse de rotation, c'est-à-dire proportionnel au régime du moteur. Comme la perméabilité du moteur est sensiblement constante, il s'ensuit que la variation de pression au refoulement de la pompe est proportionnelle au carré du régime. Le rôle du clapet limiteur de pression est de permettre l'écoulement de l'huile du refoulement à l'aspiration ou directement à la cuvette selon la disposition choisie, si la pression dépasse

une valeur déterminée. Lorsque le clapet assure le retour d'huile à l'aspiration de la pompe il est du type noyé. Cette disposition qui conduit généralement à incorporer le clapet au corps de pompe, présente l'inconvénient, en cas de blocage en position ouverte, d'empêcher l'amorçage de la pompe et il entraîne le recyclage d'huile émulsionnée par le laminage. En revanche, l'amortissement dû au freinage dans l'huile limite les risques de vibrations du clapet. Si le retour d'huile a lieu dans la cuvette, de préférence en dessous du niveau d'huile pour limiter la formation d'émulsion, le clapet peut être du type noyé ou sec et on ne risque plus dans ce cas d'ennuis de désamorçage. Cependant, quelle que soit la solution choisie, les risques de blocage du clapet en position ouverte doivent être exclus en raison du défaut de graissage qui pourrait en résulter à bas régime du moteur.

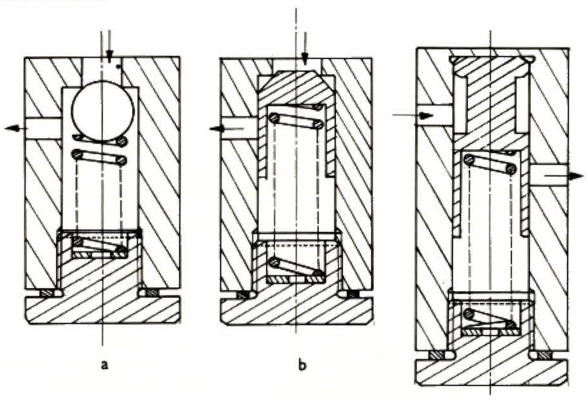


Fig. VIII-5

Clapets régulateurs de pression

La figure VIII-5 représente de façon schématique différents modèles de clapets utilisés en automobile.

— *Clapet à bille* (fig. VIII-5 a). — Ce type de clapet simple et bon marché ne présente pas une sécurité suffisante en raison de la détérioration fréquente du siège.

— *Clapet à cône* (fig. VIII-5 b). — Le clapet à cône est plus intéressant que le précédent, car le cône est centré et guidé, ce qui diminue les conséquences d'une usure de la portée du siège.

— *Clapet à piston* (fig. VIII-5 c). — Les clapets précédents ont une surface soumise à des pressions différentes selon qu'il sont en position ouverte ou en position fermée. Cela peut être la cause de mouvements vibratoires entraînant des variations de pression instantanée d'amplitude excessive dans les canalisations Le clapet à piston ne présente pas cet inconvénient et peut être, de par sa conception, efficacement amorti. En revanche, il nécessite une très bonne filtration de l'huile car l'étanchéité entre les orifices d'entrée et de décharge demande des jeux de fonctionnement faibles.

3.4. Dispositifs de filtration d'huile. — L'amélioration constante des qualités d'usinage a été un des principaux facteurs de l'augmentation de la puissance spécifique des moteurs. Elle a conduit à la réalisation d'assemblages dont la perfection géométrique a permis d'obtenir des jeux de fonctionnement tels que les chocs et les vibrations entraînent des pertes d'énergie négligeables. En contrepartie les qualités de lubrification requise de ces assemblages ont nécessité l'utilisation d'une huile exempte de particules solides dépassant une certaine dimension. À titre d'exemple, nous prendrons le cas d'un palier de ligne d'arbre où le jeu minimal entre tourillon et coussinet peut atteindre une valeur inférieure à 0,01 mm. Il est évident que, dans ce cas, une particule solide incrustée dans l'antifriction du coussinet et dépassant 5 μm risque de rayer la portée du tourillon. Par ailleurs l'accumulation de telles particules entraîne à l'usage l'usure prématurée de la portée et, par suite, une augmentation des jeux de fonctionnement et la réduction du rendement du moteur. Le rôle essentiel de la filtration est donc de retenir les éléments nuisibles à la lubrification et qui sont en suspension dans l'huile. Il faut cependant tenir compte du fait qu'une filtration trop poussée pourrait devenir néfaste en retenant certains additifs contenus dans l'huile et destinés à améliorer les qualités de frottement.

Il existe deux moyens principaux pour séparer de l'huile les particules qui s'y trouvent en suspension : la séparation par couches filtrantes et la séparation par moyens physiques. Le premier procédé est le plus courant ; il est réalisé essentiellement à l'aide d'éléments filtrants à treillis (constitués par des toiles métalliques ou textiles), d'éléments constitués d'empilages de disques métalliques ou aussi de filtres en papier plissé traité. La séparation par moyens physiques est obtenue par décantation, par centrifugation, ou en mettant en œuvre un champ magnétique ou des champs électrostatiques. Deux de ces moyens sont ou ont été employés en automobile : épurateur centrifuge brevet Simca-Fiat, monté en bout du vilebrequin, épurateur centrifuge licence Glacier équipant certains moteurs Diesel, bouchon magnétique faisant également office de bouchon de vidange de la cuvette d'huile.

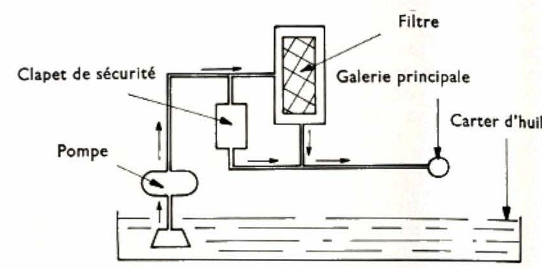


Fig. VIII-6 a — Branchement du filtre en série ou à plein débit

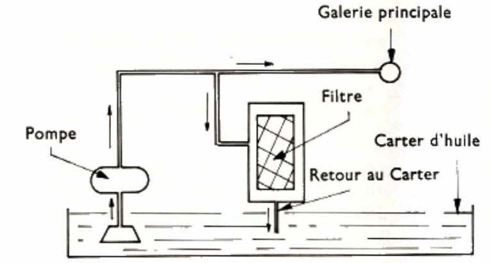


Fig. VIII-6 b — Branchement du filtre en dérivation

En dehors des qualités propres du filtre, les résultats obtenus sont fonction de la disposition choisie pour assurer la filtration. Parmi les dispositions les plus fréquentes nous pouvons citer (fig. VIII-6) :

— le branchement du filtre en série ou à plein débit ;

— le branchement en dérivation.

Le branchement en série (fig. VIII-6 a) permet de filtrer la totalité de l'huile utilisée pour la lubrification du moteur. Cette disposition assure donc une bonne protection du moteur mais elle présente l'inconvénient de nécessiter l'emploi d'éléments filtrants de grande surface, et par conséquent encombrants, pour assurer une filtration suffisante sans perte de charge excessive. Il est de plus en plus fréquent de brancher le filtre directement sur les canalisations du carter moteur de façon à éliminer les tuyauteries extérieures. La perte de charge, occasionnée par l'écoulement d'huile dans le filtre, dépend de la finesse de filtration requise et de la quantité d'impuretés filtrées. En utilisation, l'élément filtrant se colmate et la perte de charge augmente. Il est donc nécessaire de prévoir le remplacement périodique de cet élément pour éviter à la longue un défaut de lubrification consécutif à la réduction de sa perméabilité. Il faut cependant tenir compte qu'un encrassement anormal est toujours possible pour une raison ou pour une autre et que la résistance qu'oppose le filtre à l'écoulement dépend également de la viscosité de l'huile dont les variations avec la température sont très importantes.

Dans le cas du branchement en dérivation (fig. VIII-6 b) une partie seulement de l'huile débitée par la pompe est filtrée. Cette disposition, évidemment moins efficace que la

précédente, présente des avantages et des inconvénients. Du point de vue des avantages, nous citerons l'encombrement moindre du filtre et la possibilité d'obtenir une finesse de filtration plus grande pour l'huile qui traverse le circuit de filtration. Par ailleurs, le colmatage de l'élément filtrant ne présente pas de risques immédiats de défaut de lubrification. En ce qui concerne les inconvénients, il faut noter que le débit d'huile participant au graissage est égal à la différence entre le débit de la pompe diminué de celui du clapet de surpression et le débit à travers le filtre, en sorte que toute évolution de la perméabilité de ces éléments en utilisation peut entraîner une réduction ou une augmentation de la quantité d'huile nécessaire au graissage. De plus, pour des raisons de sécurité, le débit filtré ne représente qu'une fraction comprise entre 10 et 25 % du débit de la pompe, ce qui fait que la probabilité de trouver des particules plus grossières dans l'huile participant au graissage, principalement pendant les premières heures de fonctionnement du moteur, est assez grande.

3.5. Dispositifs de refroidissement d'huile. — Une partie de l'énergie dégagée par la combustion se transmet à l'huile de graissage. Il est donc nécessaire

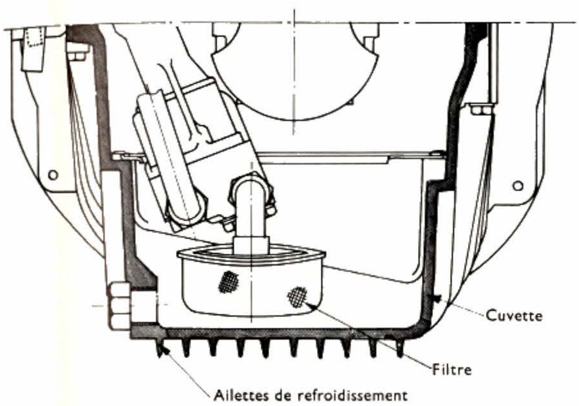


Fig. VIII-7 — Coupe transversale d'une cuvette d'huile munie d'ailettes de refroidissement

d'évacuer la chaleur ainsi transmise pour limiter à une valeur acceptable (100 à 120 °C) la température de l'huile. Pour fixer les idées, dans un moteur de compétition à carter sec, l'énergie évacuée par l'huile représente, à pleine charge, 10 à 20 % de la puissance sur l'arbre selon le régime.

Sur les moteurs de faible puissance spécifique (40 à 50 ch/l, soit 28 à 35 kW/l) à allumage commandé équipant les véhicules automobiles, le refroidissement de l'huile est généralement assuré par les parois balayées par l'air du fait du déplacement du véhicule. Il peut être amélioré par un dessin approprié de la cuvette d'huile et du couvre-culasse afin d'obtenir une meilleure ventilation, par exemple, en munissant ces éléments d'ailettes de refroidissement (fig. VIII-7).

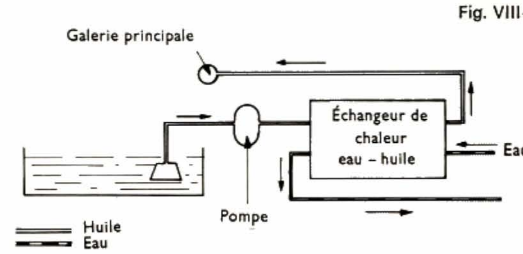
Dans les moteurs où la circulation d'air est insuffisante (moteurs de tracteur, d'engins de travaux publics, etc.) ainsi que sur les moteurs de puissance spécifique élevée (moteurs de compétition 70 à 150 ch/l, soit de 50 à 110 kW/l) et sur les moteurs Diesel à forte pression moyenne effective (moteurs suralimentés), l'évacuation de la chaleur par les parois n'est pas suffisante et on a généralement recours aux refroidisseurs d'huile. Il existe deux types de refroidisseurs :

— les refroidisseurs huile-eau ou échangeurs de chaleur huile-eau ;

— les refroidisseurs huile-air appelés aussi radiateurs d'huile.

La figure VIII-8 a représente le schéma de branchement d'un échangeur huile-eau sur le circuit de pression d'un système de graissage à carter humide. L'eau qui alimente l'échangeur provient du circuit d'eau de refroidissement du moteur. La figure VIII-8 b montre la disposition d'un radiateur d'huile sur un circuit de graissage à carter sec.

Fig. VIII-8 a



Refroidissement d'huile par échangeur de chaleur eau-huile

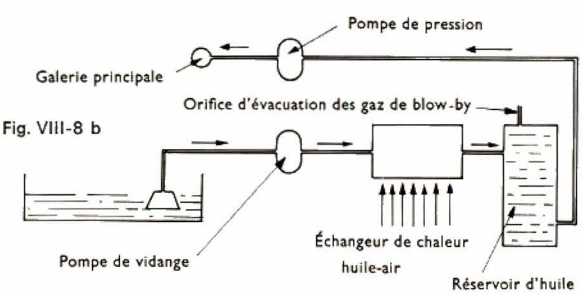


Fig. VIII-8 b

Refroidissement d'huile par échangeur huile-air

CHAPITRE IX

LE REFROIDISSEMENT

Les refroidissements par eau et par air sont concurrents et présentent tous deux des avantages et des inconvénients. Le refroidissement par eau est le plus répandu bien qu'il soit un moyen indirect d'évacuation de la chaleur (puisque la chaleur transmise à l'eau est finalement cédée à l'air).

Nous pouvons considérer que le refroidissement par air présente, vis-à-vis du refroidissement par liquide, un certain nombre d'avantages pratiques parmi lesquels il faut noter l'absence de radiateur et l'élimination des risques de gel, la mise en température rapide (et la réduction de l'usure), la corrosion plus faible en particulier avec l'emploi de combustibles chargés en soufre car la température des parois de cylindre est supérieure à la température de condensation de l'acide sulfurique. En revanche, parmi les inconvénients, il faut citer l'augmentation du niveau sonore du fait de l'absence d'une chemise d'eau qui absorbe les sons. De plus, la soufflante de refroidissement émet un bruit sifflant. En outre, la réfrigération d'huile doit être plus importante. Par suite des températures d'admission plus élevées qui réduisent le remplissage, les puissances spécifiques peuvent être plus basses qu'avec le refroidissement par eau mais le rendement global est identique si la puissance d'entraînement de la soufflante ne dépasse pas 6 % de la puissance effective du moteur. Les températures de piston étant en moyenne plus élevées, le refroidissement par air n'est pas utilisable sur les gros moteurs : les parcours de chaleur sont trop longs et, en conséquence, les températures dépassent les limites admissibles.

La quantité de chaleur à évacuer est difficile à évaluer par un calcul théorique mais, à partir de valeurs expérimentales, il est possible d'en prévoir a priori l'ordre de grandeur. Pour un moteur idéal dont le rendement indiqué et le rendement mécanique seraient de 100 % (V. chap. 5 § 2.1), si la chaleur introduite dans le cycle est égale à Q, la quantité de chaleur à évacuer atteint : $Q\,(1 - \eta)$, η étant le rendement thermodynamique du cycle. Le moteur réel cède en fait à l'extérieur une quantité de chaleur égale à $Q\,(1 - \eta_g)$, η_g étant le rendement global. La différence entre ces deux valeurs correspond à la chaleur évacuée par le refroidissement (parois, eau ou air et huile) augmentée de la chaleur des gaz d'échappement. Après avoir appliqué une correction à l'aide d'un coefficient expérimental λ, on écrit que la chaleur de refroidissement est égale à la fraction : $\lambda \,.\left(\dfrac{\eta - \eta_g}{\eta_g}\right)$ de la puissance effective du moteur. En exprimant le rendement global en fonction de la consommation spécifique Cs (V. chap. 5 § 3), la relation précédente devient : $\lambda\left(\dfrac{\eta Cs}{63{,}2} - 1\right)$. L'expérience montre que λ est sensiblement égal à 1 pour les moteurs à refroidissement par air, et est compris entre 1 et 1,5 pour les moteurs à refroidissement par eau.

Cela montre qu'avec le refroidissement par air, la quantité de chaleur à évacuer est moindre qu'avec le refroidissement par eau. Toutefois, sa mise au point peut être délicate dans la mesure où il est indispensable d'éviter les surchauffes locales.

Il est intéressant de connaître non seulement les quantités de chaleur à évacuer mais aussi le flux de chaleur à travers les surfaces intéressées par le fluide de refroidissement en tenant compte que la culasse évacue la majeure partie de la chaleur (jusqu'à 80 % sur les moteurs refroidis par air).

En exprimant l'étendue de la surface de refroidissement par son rapport φ à la surface de piston, la quantité de chaleur à évacuer par mètre carré de surface et par heure est donnée par la relation suivante :

$$\Phi = 632\ \lambda\left(\frac{\eta\,.\,Cs}{63{,}2} - 1\right).\ \frac{W}{\varphi\,\dfrac{\pi\ d^2}{4}}$$

avec :

W : puissance effective du moteur par cylindre (en chevaux) ;

d : diamètre de l'alésage (en mètres).

Dans cette expression Φ est exprimé en kilocalories (ou millithermies) par mètre carré-heure.

Prenons pour exemple un moteur à allumage commandé à refroidissement par eau pour lequel nous avons les valeurs caractéristiques suivantes :

λ = 1,5 ;
η = 0,450 (rapport volumétrique : 10, exposant polytropique : 1,26) ;
φ = 3 ;
d = 0,085 m ;
W = 35 ch ;
Cs = 230 g/ch.h.

Nous obtenons : $\Phi \approx$ 124 000 kcal/m².h.

L'expérience montre que le flux de chaleur peut atteindre 250 000 kcal/m².h dans le cas d'une conception soignée du système de refroidissement.

1. LE REFROIDISSEMENT PAR EAU

Grâce à sa grande chaleur massique (1 kcal/kg.K), à sa forte chaleur latente de vaporisation (539 kcal/kg à 100 °C) et sa faible viscosité ($0{,}326\,.\,10^{-6}$ m²/s à 90 °C) l'eau est un fluide de refroidissement presque idéal.

Mais elle présente deux caractéristiques gênantes : sa tension de vapeur élevée au-delà de 100 °C (ce qui interdit le refroidissement à haute température si le circuit n'est pas pressurisé) et sa température de solidification de 0 °C.

Du point de vue physique, l'échange de chaleur avec les parois du moteur s'effectue d'abord par convection. L'écoulement laminaire devient turbulent par l'apport ascendant de chaleur et l'eau échappe à l'évaporation qui fait apparaître des bulles de vapeur d'abord minuscules. Avec

la formation accélérée de bulles et la mise en mouvement correspondante, le coefficient d'échange augmente jusqu'à ce que l'apport de chaleur entraîne la formation d'un film de vapeur continu. L'effet isolant de la couche de vapeur réduit alors le coefficient de convection qui d'un maximum de 30 000 kcal/m².h.°C environ décroît à la limite de 1 200 kcal/m².h.°C. Avec la densité de flux de chaleur de 124 000 kcal/m².h de l'exemple précédent la courbe de la figure IX-1 montre une chute de température de 11 °C

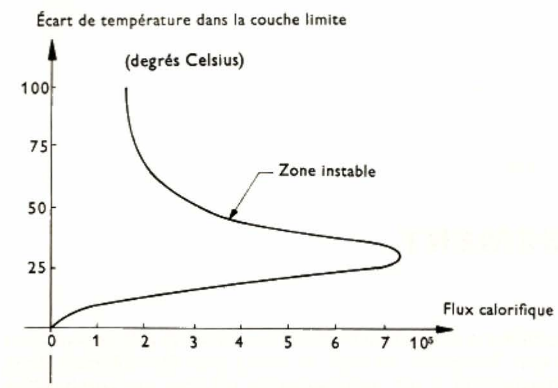


Fig. IX-1 — Convection avec vaporisation de l'eau (le flux calorifique est exprimé en kilocalories par mètre carré-heure)

dans la couche limite d'où un coefficient de convection d'environ 11 300 kcal/m².h.°C. Le point d'utilisation se trouve donc encore dans la zone stable et une surcharge est possible, pourvu que l'évacuation de la vapeur naissante soit assurée et que la pression soit suffisante pour éviter l'ébullition.

— *Circulation d'eau.* — La circulation d'eau dans le moteur résulte toujours de la combinaison des deux dispositions suivantes :

1° *Circulation transversale.* — Une galerie de forte section alimente chaque cylindre séparément et un collecteur récupère l'eau au niveau de la culasse, cylindre par cylindre (fig. IX-2 a). Cette solution est utilisée plus spécialement sur les moteurs Diesel et les moteurs de compétition. Elle est pratiquement exclue en automobile en raison de son prix de revient.

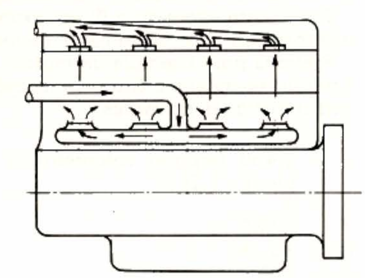


Fig. IX-2 a

Circulation d'eau transversale

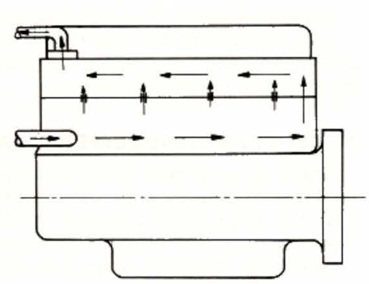


Fig. IX-2 b

Circulation d'eau longitudinale

2° *Circulation longitudinale* (fig. IX-2 b). — L'eau arrive à une extrémité du bloc cylindre, refroidit les cylindres en série et monte à la culasse où elle circule dans le sens longitudinal. Des orifices de faible diamètre mettent en communication la partie supérieure des cylindres et la culasse pour éviter l'accumulation de poches de vapeur dans les zones en cul-de-sac des chambres d'eau.

Le circuit de refroidissement des moteurs modernes se présente selon le schéma de la figure IX-3. Une pompe du type centrifuge entraînée par le moteur entretient la circulation du liquide de refroidissement qui transfère la chaleur des parties chaudes du moteur vers les radiateurs de refroidissement et de chauffage (pour les moteurs équipant les véhicules automobiles). Un thermostat contrôlant le débit d'eau dans le radiateur assure la régulation de température en fonctionnement et active la mise en température du moteur

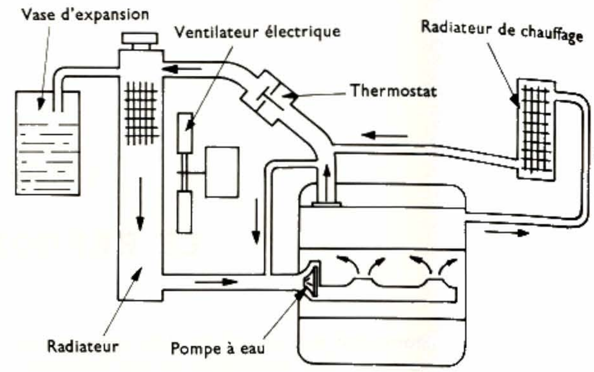


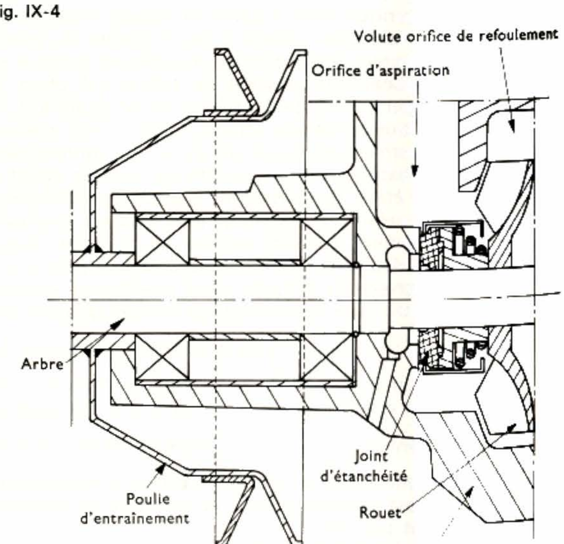
Fig. IX-3 — Schéma d'un circuit de refroidissement scellé

au démarrage. Un vase d'expansion limite la pression atteinte dans le circuit. Le ventilateur crée une circulation forcée d'air à travers le radiateur pour en augmenter l'efficacité aux basses vitesses du véhicule. Aux grandes vitesses, l'action du ventilateur s'ajoute à celle de la circulation naturelle mais il devient vite inutile ; cela a conduit les constructeurs à utiliser des ventilateurs débrayables entraînés directement par le moteur ou par un moteur électrique. La mise en action du ventilateur est alors réalisée par l'intermédiaire d'un thermostat et est fonction de la température atteinte par l'eau de refroidissement.

1.1. La pompe à eau. — Sous un encombrement réduit et au détriment de la puissance absorbée (elle reste faible malgré tout) la pompe à eau doit présenter un grand débit sous une pression assez faible. C'est la raison pour laquelle on utilise exclusivement des pompes centrifuges généralement à aubes radiales.

La figure IX-4 représente la coupe longitudinale d'une pompe à eau de moteur. Dans le corps de pompe, qui comporte les orifices d'admission et de refoulement, tourillonne l'arbre dont une extrémité supporte le rouet et l'autre extrémité la poulie d'entraînement. L'étanchéité entre parties mobile et fixe est obtenue par un joint tour-

Fig. IX-4



nant ou un joint fixe. L'arbre tourillonne sur deux paliers à roulements.

Le débit de la pompe dépend de la vitesse périphérique du rouet, du tracé de la volute et de la perte de charge dans les circuits de refoulement et d'admission. Il est proportionnel à la vitesse de rotation dans la limite de l'apparition de phénomènes de cavitation. Dans la mesure du possible, la vitesse de l'eau dans les tuyauteries principales doit être voisine de 1 à 1,5 m/s à l'aspiration et de 1,5 à 2,5 m/s au refoulement.

Le débit d'eau nécessaire peut être estimé de la façon suivante :

Désignons par Δt l'écart de température entre l'entrée et la sortie du moteur (sa valeur est généralement comprise entre 5 et 10 °C), par D le débit (volume d'eau en mètres cubes par heure), par C_p la chaleur massique de l'eau (en kilocalories par kilogramme-degré Celsius) et par ρ sa masse volumique (en kilogrammes par mètre cube). Compte tenu des résultats qui précèdent, la condition d'équilibre des quantités de chaleur s'écrit :

$$D \cdot \rho \cdot C_p \Delta t = 632\ \lambda \left(\frac{\eta \cdot Cs}{63{,}2} - 1\right) W$$

d'où :

$$D \text{ (mètres cubes par heure)} = \lambda \left(\frac{\eta Cs}{63{,}2} - 1\right) \frac{W}{\rho\ C_p \Delta t}\ 632$$

La puissance W_p, exprimée en chevaux (1 ch = 735 W), absorbée par la pompe à eau est égale à :

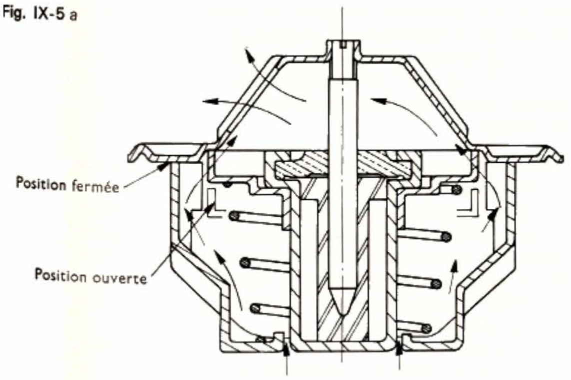
$$W_p = \frac{1}{27 \cdot 10^4} \cdot \frac{D\ \Delta p}{\eta_g}$$

Δp : écart de pression aspiration-refoulement en décanewtons par mètre carré ;
η_g : rendement global de la pompe.

1.2. Thermostat et circuit de by-pass. — Le contrôle par un thermostat de la chaleur dissipée dans le radiateur présente de nombreux avantages en raison du maintien à une valeur constante de la température du moteur ; quelles que soient ses conditions d'utilisation. Parmi ces avantages citons l'économie de combustible, la réduction de la dilution de l'huile de graissage par le combustible imbrûlé et de la corrosion des parois internes des cylindres, la possibilité d'assurer le chauffage du véhicule à une température suffisante en hiver. Les thermostats utilisés sont de deux types.

1° *Thermostat à fusion* (fig. IX-5 a). — C'est la dilatation d'un volume de cire, fonction de la température, qui provoque l'ouverture de la soupape. Ce dispositif a l'avantage d'être insensible à la pression du circuit de refroidissement mais est influencé par la perte de charge dans la section contractée et son inertie thermique est relativement importante.

Fig. IX-5 a



2° *Thermostat à tension de vapeur* (fig. IX-5 b). — Dans ce système, c'est la tension de vapeur du liquide enfermé dans une capsule à soufflet qui provoque l'ouverture de la soupape à une certaine température. Son fonctionnement est influencé par la pression du circuit et les vibrations

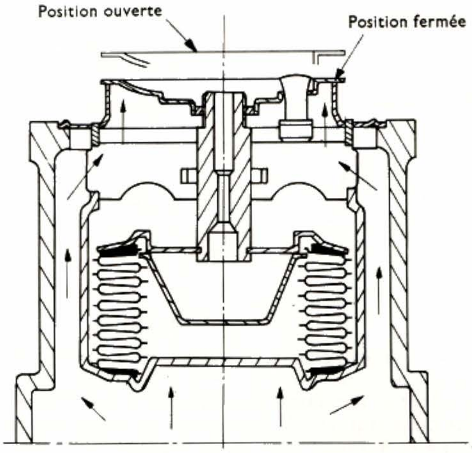


Fig. IX-5 b

peuvent entraîner la destruction du soufflet. En revanche, son inertie thermique est faible.

La nécessité de maintenir une circulation d'eau dans le moteur, pour éviter un écart de température excessif lorsque le thermostat est fermé, conduit à prévoir un circuit de by-pass de faible section entre la sortie d'eau de la culasse et l'aspiration de la pompe. Le débit de ce circuit vient en déduction du débit à travers le radiateur mais il n'y a pas de chaleur inutilement dissipée au cours de la montée en température du moteur et celle-ci est très rapide.

1.3. Circuit sous pression. — Nous avons vu (V. § 1) que la tension de vapeur élevée de l'eau interdit pratiquement le refroidissement à haute température. L'ébullition peut en effet se produire dans le circuit dès l'instant où la température est telle que la tension de vapeur est égale à la pression absolue dans l'eau. De telles conditions, obtenues par exemple à l'aspiration de la pompe, pourraient entraîner une annulation du débit d'eau, c'est-à-dire la destruction rapide du moteur. Sans atteindre cette limite, il faut savoir que l'eau contient toujours des gaz dissous qui se dégagent lorsque la pression du circuit devient inférieure à leur pression critique de solubilité à la température considérée. C'est pourquoi, dans le but d'augmenter la capacité des systèmes de refroidissement, le bouchon du radiateur d'eau comporte un clapet taré qui assure la mise en pression du circuit et retarde l'ébullition. L'augmentation de pression résulte de la dilatation de l'eau du circuit, de la dilatation de l'air et de la pression partielle de la vapeur d'eau à la surface libre du radiateur. L'élévation de pression peut entraîner l'évacuation d'une certaine quantité d'eau vers l'extérieur et la mise sous vide du circuit après refroidissement. Pour éviter cet inconvénient on ajoute un clapet à dépression qui permet à l'air de rentrer quand la pression interne du circuit devient inférieure à la pression extérieure. Un perfectionnement qui évite les appoints d'eau et qui permet d'utiliser un liquide de refroidissement unique, été comme hiver, consiste à disposer un vase d'expansion de volume suffisant pour empêcher l'évacuation. Le vase d'expansion peut d'ailleurs être placé en dehors du radiateur (V. fig. IX-3).

2. LE REFROIDISSEMENT PAR AIR

Le coefficient d'échange est beaucoup plus faible qu'avec le refroidissement par eau. De plus, la masse volumique de l'air n'est que le millième de celle de l'eau et sa chaleur massique, environ le quart. C'est pourquoi, pour le refroidissement par air il faut de forts débits et de grandes vitesses. De plus, il faut augmenter la surface d'échange par des ailettes et admettre de plus grandes chutes thermiques donc des températures de parois plus élevées.

2.1. Forme des ailettes. — On démontre que la forme des ailettes assurant la meilleure utilisation de la matière au point de vue refroidissement est la forme parabolique car c'est elle qui donne un flux de chaleur constant, quelle que soit la section envisagée. En pratique cette forme n'est pas

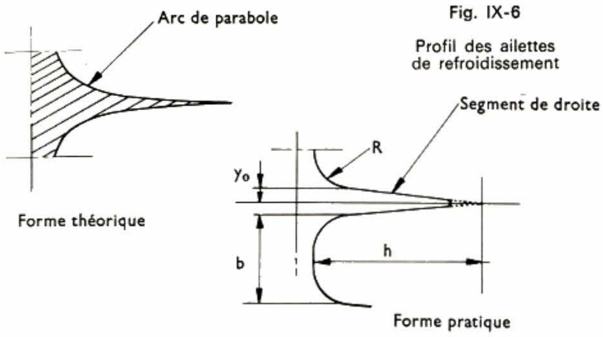


Fig. IX-6
Profil des ailettes de refroidissement

réalisable, mais celle qui s'en rapproche le plus est le profil trapézoïdal avec rayon de raccordement entre les ailettes, à condition d'adopter certaines proportions entre hauteur et largeur à la base (fig. IX-6). Ces proportions qui ont été déterminées par E. Schmidt sont les suivantes :

$$\text{hauteur} : h = \frac{1{,}684 \,.\, q}{\alpha \,.\, t_0}$$

$$\text{demi-base} : y_0 = \frac{1{,}655}{\alpha \,.\, \lambda}\left(\frac{q}{t_0}\right)^2$$

avec :

h et y_0 en mètres

q : puissance calorifique d'une face latérale d'ailette par mètre de longueur (kilocalories par mètre-heure) ;

t_0 : température maximale du pied de l'ailette au contact de l'air de refroidissement (degrés Celsius) ;

λ : conductibilité calorifique du matériau des ailettes (kilocalories par mètre-heure degré Celsius) ;

α : coefficient de convection de l'ailette avec l'air (kilocalories par mètre carré-heure degré Celsius).

Les valeurs de λ dépendent évidemment du matériau employé ; les valeurs de α nécessaires à l'évacuation de la chaleur sont fonction de la densité du flux de chaleur Φ du côté refroidi. J. Zeyns aboutit dans son étude à deux équations qui permettent de définir la géométrie de l'ailette, compte tenu des relations précédentes :

$$\frac{\Phi}{t_0} = \frac{\dfrac{3{,}368 \,.\, q}{t_0} + b\alpha}{\dfrac{5{,}88}{\alpha\lambda} \,.\, \left(\dfrac{q}{t_0}\right)^2 + 1{,}684 \,.\, b}$$

$$q = \frac{\alpha\, b t_0}{3{,}368} \,.\, \left[\sqrt{1 + \lambda \frac{3{,}435}{\alpha \,.\, b}} - 1\right]$$

b est l'intervalle entre ailettes à la base mesuré en mètres.

Comme matériaux d'ailettes on emploie la fonte grise, l'alliage léger et beaucoup plus rarement le cuivre. Les conductibilités calorifiques de ces matériaux sont données dans le tableau ci-dessous.

Matériaux	Kilocalories par mètre heure degré Celsius
Fonte grise	50
Alliage léger	155
Cuivre	320

Comme exemple d'application considérons le cas suivant :

$\Phi = 124\,000$ kcal/m^2.h ; $t_0 = 100$ °C ; $b = 4$ mm

Par le calcul nous obtenons :

λ : kilocalories par mètre-heure degré Celsius	h (millimètres)	y_0 (millimètres)	α : kilocalories par mètre carré-heure degré Celsius
50	21	1,68	345
175	69	1,95	120
320	124	1,95	65

Ces résultats montrent que les ailettes sont d'autant plus hautes, et les coefficients de convection plus faibles, que les conductibilités thermiques augmentent. Avec de grands coefficients de convection l'importance de l'ailetage diminue (c'est pourquoi le refroidissement par eau ne nécessite pas d'ailettes).

2.2. Puissance absorbée pour le refroidissement. — Pour calculer la puissance nécessaire au refroidissement il faut connaître la vitesse V de l'air à travers les canaux formés par les ailettes. Cette vitesse est déterminée, pour obtenir le coefficient de convection α.

$$\alpha = 2{,}4 \,.\, 10^{-2} \,.\, \frac{\lambda_a}{D}\left(\frac{V \,.\, D}{\nu}\right)^{0{,}8} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{\nu}{D}\left(\frac{\alpha D}{\lambda_a} \,.\, 41{,}6\right)^{1{,}25}$$

avec :

λ_a : conductibilité calorifique de l'air (en kilocalories par mètre-heure degré Celsius),

D : diamètre hydraulique (V. ci-après) du canal formé par deux aubages successifs (en mètres),

ν : viscosité cinématique de l'air (en mètres carrés par seconde).

Comme le diamètre hydraulique est égal par définition à quatre fois la section mouillée divisée par le périmètre mouillé, on obtient approximativement :

$$D = 4\, h \,.\, \frac{y_0 + b}{2h + b}$$

La vitesse V de l'air étant connue, nous pouvons calculer la puissance théorique Q_t à produire pour le souffler à travers la section $S = h(y_0 + b)$

$$\text{Soit} : Q_t = \frac{3\,600}{427} \,.\, S . V . \Delta p \quad \text{(kilocalories par heure)}$$

$$\text{Avec} : \Delta p = \rho \frac{V^2}{2} \,.\, \varphi \,.\, \frac{L}{D}$$

φ : coefficient de résistance à l'écoulement (0,05) ;

ρ : masse volumique de l'air ;

L : longueur de l'ailette comptée dans le sens de l'écoulement.

Nous pouvons d'ailleurs rapporter la puissance Q_t à la quantité de chaleur Q évacuée par ailette. En appelant Δt l'écart de température moyen entre l'air et les parois d'ailettes, il vient :

$$Q = \alpha(2h + b) \,.\, L \,.\, \Delta t$$

$$\frac{Q_t}{Q} = 1{,}055 \,.\, \frac{S\, \varphi\, \rho\, V^3}{\alpha \,.\, \Delta t}$$

Cela montre que la puissance dépensée croît comme $V^{2,2}$ puisque α croît comme $V^{0,8}$, et qu'il est donc avantageux d'utiliser un matériau bon conducteur malgré l'augmentation de la hauteur des ailettes qui en résulte.

Les valeurs réelles de la puissance dépensée pour le refroidissement par air ne peuvent être estimées que très grossièrement a priori en raison des pertes de charge à l'entrée et à la sortie du système de refroidissement et du rendement de la soufflante. En pratique la puissance nécessaire à l'entraînement des soufflantes de refroidissement représente 7 % environ de la puissance effective du moteur au régime nominal. Ces soufflantes sont du type axial ou centrifuge.

2.3. Architecture du cylindre et de la culasse. — La nécessité de maintenir des espaces suffisants entre les cylindres et les culasses d'un moteur à refroidissement par air, pour permettre le passage de l'air, conduit généralement à disposer les cylindres à plat dès que leur nombre est supérieur à deux. La disposition en ligne est évidemment possible mais l'encombrement devient prohibitif lorsque le nombre des cylindres est grand.

Le cylindre et la culasse sont généralement détachables, il existe cependant des exemples d'utilisation de fût borgne.

Les ailettes du cylindre viennent dans la plupart des cas de fonderie, leur longueur décroît avec l'éloignement du plan de joint de la culasse. Le choix de leur disposition est guidé par le souci de rendre homogène la répartition des températures et de ne pas gêner la dilatation du cylindre (de manière qu'il garde sa forme ronde). Les culasses sont en alliage léger. On s'efforce d'assurer un refroidissement effi-

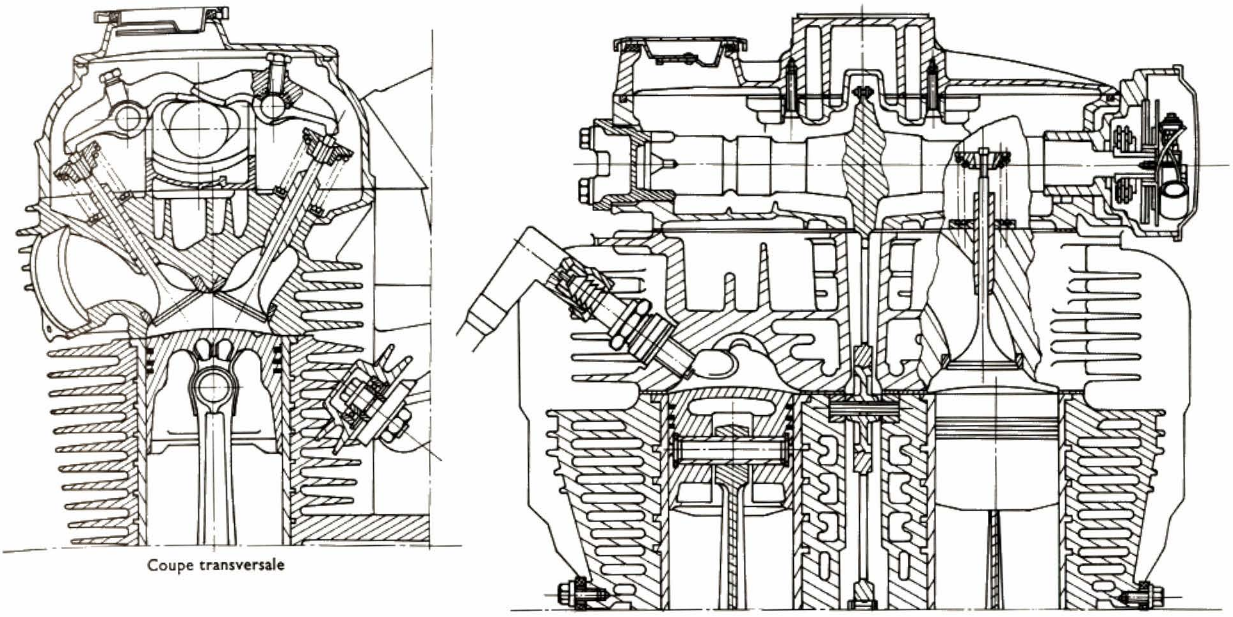


Fig. IX-7 — Coupes d'un moteur deux cylindres Honda N. 500 à refroidissement par air

cace des points les plus chauds et en particulier des parties avoisinant la soupape d'échappement. La figure IX-7 montre, à titre d'exemple, le bloc-cylindre et la culasse d'un bicylindre en ligne refroidi par air à simple arbre à cames en tête et chambre hémisphérique. Pour le refroidissement de la culasse et du cylindre, il importe d'obtenir, comme nous l'avons vu précédemment, une grande vitesse de passage d'air entre les ailettes. En raison des effets de couche limite et du fait de la disposition plus ou moins complexe des ailettes, l'expérience montre que cette condition ne peut être obtenue qu'en considérant l'ensemble culasse-cylindre comme imperméable à l'air, excepté entre les ailettes. Le tracé et la disposition des déflecteurs ont aussi un rôle important en ce qui concerne l'efficacité du refroidissement.

La ventilation directe ne se rencontre que sur les moteurs de motocyclettes et n'est que très rarement utilisée en automobile, où elle n'assurerait pas un refroidissement suffisant à faible vitesse du véhicule. Il faut noter aussi que l'emploi d'une telle solution, si elle était possible, ne permettrait pas le chauffage de l'intérieur du véhicule.

CHAPITRE X

L'ALIMENTATION

1. CARBURANTS ET COMBUSTIBLES

Les moteurs des véhicules automobiles peuvent être alimentés avec :

— *des combustibles liquides :* essence, gasoil, pétrole, alcools, benzol ;

— *des combustibles gazeux :* gaz naturels, gaz d'éclairage ;

— *des combustibles solides :* bois, charbon de bois, anthracite, coke, semi-coke, qui sont préalablement transformés en combustibles gazeux au moyen d'un gazogène placé sur le véhicule.

Les combustibles *liquides pétroliers* sont de très loin les plus utilisés

1.1. Combustibles liquides pétroliers. — L'essence et le gasoil proviennent de la distillation du pétrole brut ou *naphte*. Les principaux gisements de pétrole actuellement exploités se trouvent aux États-Unis d'Amérique, au Venezuela, dans le Moyen-Orient (Iran, Irak, Arabie), en U.R.S.S. et au Sahara. La France possède également quelques gisements pétroliers de moyenne ou faible importance. Ils se trouvent principalement dans le Sud-Ouest, mais aussi dans la région parisienne (Meaux-Fontainebleau) et en Alsace (Pechelbronn).

Le pétrole brut subit une première épuration qui le débarrasse des boues et de l'eau entraînées, puis il est distillé. La distillation comprend généralement deux phases :

— Une première distillation, dans laquelle le pétrole brut est simplement soumis à l'action de la chaleur. Elle permet de séparer l'éther de pétrole, les essences, le pétrole lampant, les huiles légères et le mazout. Les masses volumiques de ces corps vont en croissant depuis 0,680 g/cm^3 pour les éthers de pétrole jusqu'à des nombres voisins de l'unité pour le mazout. Les quantités recueillies de chacun des constituants ci-dessus varient beaucoup avec l'origine du pétrole brut. Cette première distillation fractionnée du pétrole brut ne donne que des quantités insuffisantes d'essence, eu égard à la consommation, tandis que les produits lourds sont en trop grande quantité. On a réussi à combler cette lacune en traitant une seconde fois les produits lourds excédentaires.

— Une seconde distillation permet de soumettre les produits lourds à l'influence de la température et de la pression en présence de catalyseurs et parfois d'hydrogène. Il se produit des phénomènes de dissociation thermique ou *cracking*. Les molécules d'hydrocarbures lourds sont dissociées et on obtient, d'une part, des hydrocarbures légers (essences) et, d'autre part, des produits extra-lourds dont on tire des huiles de graissage et des graisses consistantes.

L'utilisation du cracking a donné une très grande souplesse à l'industrie du pétrole en lui permettant de suivre plus facilement l'accroissement des demandes pour un produit déterminé.

Les combustibles liquides pétroliers utilisés dans les moteurs d'automobiles sont l'essence (moteurs à carburation préalable), le gasoil (moteurs à combustion à huile lourde) et le pétrole (moteurs-turbines).

Au point de vue chimique, ces combustibles sont caractérisés par la nature de leurs composants (exemple : hydrocarbures paraffiniques, éthyléniques, aromatiques) et par leurs teneurs en gommes, en soufre, et par leur acidité.

Les caractéristiques physiques principales intéressantes pour l'emploi dans les moteurs des combustibles liquides, pétroliers ou autres, sont :

— la *courbe de distillation* qui indique l'homogénéité du combustible, sa teneur en produits légers (qui influe sur la facilité d'allumage) et sa teneur en produits lourds (qui montre la plus ou moins grande aptitude à une combustion complète) ;

— la *masse volumique* et le *pouvoir calorifique* dont dépendent la consommation, la facilité de stockage à bord du véhicule et l'autonomie sans ravitaillement pour un volume déterminé de réservoir ;

— la *chaleur latente de vaporisation* et la *tension de vapeur* dont dépendra la facilité du démarrage à froid ;

— l'aptitude à supporter de fortes compressions sans cliquetis ou *indétonance;* cette qualité, très recherchée pour l'utilisation dans les moteurs à explosion, est caractérisée par le *nombre* ou *indice d'octane ;*

— l'aptitude à s'enflammer facilement sous l'influence de la compression ; cette qualité est demandée aux combustibles pour moteurs à combustion, elle se mesure par le *nombre* ou *indice de cétane*.

1.2. Indice d'octane. — Nous savons que l'augmentation du taux de compression accroît le rendement et détermine une économie de combustible intéressante.

Des expériences ont montré, par exemple, qu'un moteur à 4,3 de compression développait 42 ch à 2 300 tr/mn ; le même moteur avec 5,8 de compression développait la même puissance à 1 550 tr/mn seulement.

Or, un carburant comprend des carbures du type heptane ($C_7\ H_{16}$) qui détonent facilement, et d'autres du type octane (C_8H_{18}) qui sont antidétonants. On a été ainsi conduit à caractériser le pouvoir antidétonant d'un carburant par son indice d'octane.

Avant de définir cet indice précisons que sa mesure nécessite la mise en œuvre d'un moteur à explosion à compression variable. Cette variation est généralement obtenue par le déplacement relatif du cylindre par rapport au carter. Pour obtenir des chiffres comparables entre eux, il faut utiliser un même type de moteur. Celui qui a été choisi pour le monde entier a été mis au point par la *Commission Fuel Research* américaine d'où le nom de moteur C.F.R.

Supposons qu'une essence du commerce utilisée dans ce moteur supporte, dans des conditions bien déterminées de températures d'eau de refroidissement, d'huile de graissage, d'avance à l'allumage, etc., une compression de 8 sans détoner. Si le même taux de compression est supporté dans les mêmes conditions par un mélange de 90 % d'iso-octane et de 10 % d'heptane, on dit que l'indice d'octane de l'essence du commerce essayée est de 90.

Les propriétés antidétonantes d'une essence sont en rapport direct avec son indice d'octane. Pour augmenter celui-ci il faut ajouter à l'essence, soit de l'alcool et du benzol (supercarburant) soit des corps dits antidétonants. Les antidétonants sont variés: aniline, fer-carbonyle, nickel-carbonyle, mais les plus efficaces et les seuls utilisés aujourd'hui sont le plomb tétraéthyle Pb $(C_2H_5)_4$ et le plomb tétraméthyle Pb $(CH_3)_4$. Le plomb tétraéthyle est ajouté à l'essence dans des proportions variant de 0,2 à 0,8 pour 1 000. Lorsque la teneur dépasse 0,6 pour 1 000, on observe fréquemment des ennuis de soupapes (corrosion accélérée de la soupape d'échappement) et des ennuis de bougies (mise des électrodes en court-circuit par dépôt de plomb).

Une essence d'un indice d'octane déterminé ne se comporte pas de la même façon dans tous les types de moteurs. Elle pourra détoner dans un moteur dont le taux de compression est de 7,5 et ne pas détoner dans un moteur d'un autre type dont le taux de compression est légèrement supérieur (7,8, par exemple). Cela dépend de la forme de la culasse, de la position de la bougie, de la température d'eau de refroidissement, de l'avance à l'allumage, etc.

Mais pour un moteur donné, il y a un taux de compression maximal pour une essence déterminée. Au-delà de ce taux, la marche du moteur ne sera plus acceptable.

1.3. Nombre de cétane. — De même que l'indice d'octane définit les carburants utilisés dans les moteurs à explosion, le *nombre* ou *indice de cétane* définit les combustibles utilisés dans les moteurs à huile lourde genre Diesel. Pour déterminer l'indice de cétane d'un combustible on utilise un moteur C.F.R. étalon, à allumage par compression, et on compare le comportement du combustible à étudier avec celui d'un combustible de référence.

Le combustible de référence est un mélange de cétane $C_{16}H_{34}$ et de méthylnaphtalène $C_{11}H_{10}$. Le pourcentage de cétane du mélange qui donne les mêmes qualités d'allumage, dans les mêmes conditions de compression, que le combustible essayé est appelé indice de cétane. À l'origine, on utilisait un autre hydrocarbure, le cétène $C_{16}H_{32}$. Plus difficile à produire, plus coûteux, moins stable et moins inflammable que le cétane; il a été abandonné.

L'indice de cétane minimal recommandé est de 25 à 35 pour les moteurs Diesel lents, 35 à 45 pour les moteurs semi-rapides (750 à 1 000 tr/mn) et 45 à 55 pour les moteurs Diesel rapides (1 500 à 2 500 tr/mn).

L'expérience a permis d'établir une relation empirique à la fois simple et suffisamment approchée entre le nombre d'octane N.O. et le nombre de cétane N.C. pour un même liquide combustible. On a l'égalité approximative:

$$\text{N.O.} \approx 120 - 2\ \text{N.C.}$$

1.4. Monographie des carburants et combustibles

1.4.1. Essence. — L'essence n'est pas un produit défini mais un composé de divers hydrocarbures dont les principaux sont l'hexane, l'heptane et l'octane. La masse volumique varie avec les origines du pétrole brut. Le pouvoir calorifique est de 10 500 cal/kg.

L'arrêté du 28 décembre 1966 publié au J.O. du 13 janvier 1967, a fixé ainsi les caractéristiques minimales de l'essence pour automobiles.

1° *Courbe de distillation :*

10 % au moins doivent distiller avant 70 °C;
50 % au moins doivent distiller avant 140 °C;
95 % au moins doivent distiller avant 195 °C.

La totalité doit distiller avant ou au plus à 205 °C. Le résidu ne doit pas dépasser 2,5 % en volume pour les essences ordinaires et 3 % pour les supercarburants.

2° *Masse volumique :* Inférieure à 0,765 g/cm³ à 15 °C pour les essences ordinaires et à 0,770 g/cm³ à 15 °C pour les supercarburants.

3° *Tension de vapeur :* Inférieure ou égale à 0,80 bar du 15 octobre au 30 avril et à 0,65 bar du 1er mai au 14 octobre.

4° *Teneur en gomme :* Inférieure à 0,1 mg/cm³.

5° *Teneur en soufre :* Inférieure à 0,20 % en masse pour les essences ordinaires et à 0,15 % pour les supercarburants.

6° *Essais de corrosion* à la lame de cuivre: négatif.

7° *Indice d'octane* mesuré par la méthode C.F.R.:
— essence ordinaire: 89 à 92;
— supercarburant: 97 à 99.

1.4.2. Gasoil. — Lorsqu'on distille le pétrole brut, les corps qui passent après l'essence sont le white-spirit, le pétrole, puis le gasoil, le fuel-oil, le mazout et il reste le brai.

Dans le moteur à huile lourde de camions, on utilise le gasoil. Le pouvoir calorifique est proche de 10 000 cal/kg.

Tout comme l'essence, le gasoil a une composition très différente suivant les origines du pétrole brut.

Voici les caractéristiques minimales d'un gasoil auto:

— température de congélation: inférieure ou égale à — 10 °C du 1er octobre au 31 mars et à — 7 °C du 1er avril au 30 septembre; il est important que ce point soit assez bas car avant d'atteindre cette température la viscosité du gasoil augmente déjà considérablement;

— point d'inflammabilité Luchaire (ou point d'éclair): égal ou supérieur à 55 °C et inférieur à 120 °C;
— couleur au colorimètre Union: inférieur ou égal à 5;
— viscosité cinématique à 20 °C: inférieure ou égale à 9 centistokes (soit $9 \cdot 10^{-6}$ m²/s);
— masse volumique: entre 0,810 et 0,890 g/cm³ à 15 °C;
— eau et cendres: traces non dosables;
— teneur en soufre: inférieure ou égale à 0,70 % en masse;
— acidité minérale: nulle;
— distillation: 65 % au plus doivent avoir distillé avant 250 °C; 85 % au moins doivent avoir distillé avant 350 °C;
— indice de cétane (*méthode Dumanois*): égal ou supérieur à 50.

Parmi les autres carburants liquides utilisés, citons le benzol, l'alcool et le méthanol.

1.4.3. Benzol. — Le benzol provient de la distillation de la houille; il est produit par les cokeries et les usines à gaz qui, conformément aux dispositions légales, doivent pratiquer le débenzolage du gaz.

La production française est assez faible, au maximum de 100 000 t par an.

Le benzol du commerce est à peu près entièrement composé de benzène, de formule C_6H_6, qui appartient à la série des hydrocarbures aromatiques. Il distille avant 90 °C. Son pouvoir calorifique est de 9 700 cal/kg et sa masse volumique est égale à 0,884 g/cm³.

Il est antidétonant et il facilite la miscibilité de l'essence avec l'alcool.

1.4.4. Méthanol. — Le méthanol ou alcool méthylique $CH_3 - OH$ peut provenir soit de la distillation du bois, soit d'une synthèse à partir de l'oxyde de carbone. Son pouvoir calorifique est faible: 4 620 cal/kg. Sa masse volumique est égale à 0,803 g/cm³, le pouvoir calorifique est de 3 710 cal/l. En revanche, l'alcool méthylique a une chaleur latente de vaporisation élevée. C'est ce que l'on appelle un carburant « froid »; son utilisation est courante dans les mélanges qui servent à l'alimentation des moteurs à compresseur des voitures de course. Un tel mélange peut avoir la composition suivante:

Alcool méthylique	85 %
Acétone	6 %
Essence distillant entre 35 et 70 °C	7 %
Huile de ricin	2 %

L'alcool méthylique est très antidétonant.

Remarque : L'essence et l'huile de schiste, combustibles provenant de la distillation des schistes, peuvent être utilisées aux lieu et place de l'essence et du gasoil de pétrole.

1.4.5. Pétrole ou kérosène. — Le pétrole vient après les essences lourdes et le white-spirit dans la distillation du pétrole brut. Sa masse volumique est égale à 0,800 g/cm³. En France, il est souvent appelé *pétrole lampant* en raison de son utilisation pour l'éclairage. Pour cet usage, le pétrole lampant doit répondre à certaines spécifications de sécurité (point d'inflammation assez élevé) qui ne facilitent pas son emploi dans les moteurs. Son bon marché relatif, dû à l'absence de certaines taxes, le fait utiliser dans quelques moteurs industriels et certains moteurs agricoles. Sa vaporisation difficile oblige à recourir à un réchauffage préalable, en particulier au démarrage. En outre, il est fortement détonant.

Le pétrole non rectifié ou *kérosène* est, au contraire, un excellent combustible pour les moteurs à réaction et les turbines à gaz. Le développement de l'aviation à réaction lui assure des débouchés extrêmement importants.

1.5. Carburants de synthèse. — La consommation de carburants et de combustibles s'est accrue de façon accélérée depuis ces dernières années. La crainte de voir s'épuiser les ressources naturelles de pétrole brut, la nécessité pour certains pays de se libérer des importations étrangères, ont incité les savants à rechercher la possibilité de fabriquer les carburants par voie synthétique.

C'est ainsi qu'en Allemagne des tonnages considérables d'essence ont été obtenus en partant de la houille ou des lignites traités suivant les procédés *Bergius* (hydrogénation sous pression en présence de catalyseurs).

L'*alcool éthylique* peut être obtenu à partir de la cellulose du bois, traitée soit par l'acide sulfurique, soit par l'acide chlorhydrique, tandis que la synthèse de l'*alcool méthylique* se fait industriellement à partir du gaz à l'eau.

En règle générale, le prix de revient de la calorie obtenue avec des carburants de synthèse est considérablement plus élevé que dans le cas du carburant pétrolier naturel.

1.6. Combustibles gazeux

Gaz d'éclairage. Il a un pouvoir calorifique de 4 000 cal/m³. On peut augmenter son pouvoir calorifique par la « méthanisation » qui, en présence d'un catalyseur permet de transformer l'oxyde de carbone et l'hydrogène en méthane et en eau ; on atteint 8 000 cal/m³. On peut aussi faire l'« éthanisation » (action de l'acétylène sur l'hydrogène pour obtenir de l'éthane en présence de nickel) qui donne un gaz dont le pouvoir calorifique est égal à 9 500 cal/m³.

Hydrocarbures saturés. Ils comprennent le méthane CH_4 (9 000 cal/m³), l'éthane C_2H_6, le propane C_3H_8 et le butane C_4H_{10} (2 200 cal/m³) obtenus par distillation et rectification des pétroles.

Hydrocarbures non saturés. Ils comprennent l'éthylène C_2H_4 (que l'on trouve dans les gaz de cokeries ou que l'on obtient par déshydratation de l'alcool) et l'acétylène C_2H_2 (obtenu à partir du carbure de calcium).

Actuellement, les combustibles gazeux sont utilisés principalement sous la forme *méthane*, car les gaz dits naturels, qui jaillissent des poches de pétrole brut, contiennent souvent plus de 90 % de cet hydrocarbure. Plusieurs centaines de milliers de véhicules alimentés au gaz circulent aux États-Unis d'Amérique, et près de 18 000 en France, dans le Sud-Ouest. L'utilisation pratique de ce gaz nécessite son stockage dans des bouteilles en acier où le gaz est emmagasiné sous forte pression (200 bars). La bouteille, dont la capacité est de 50 litres, contient ainsi environ 10 m³ de gaz, équivalant sensiblement à 10 l d'essence.

L'acétylène (C_2H_2) a été également utilisé comme carburant. Il était produit dans un gazéificateur placé à bord du véhicule. La réaction de l'eau tombant sur des paniers garnis de carbure de calcium libérait l'acétylène. Ce gaz ne supporte pas de compression élevée — de l'ordre de 4 à 5 — et sa combustion est « brisante ». Il doit être épuré avant l'entrée du moteur.

1.7. Combustibles divers. — L'emploi de l'alcool éthylique n'est plus autorisé par la législation française dans la composition des carburants. Cela a conduit à la disparition des carburants binaires et ternaires en usage il y a quelques années.

Quant aux combustibles solides, très utilisés par suite de la pénurie d'essence pendant la dernière guerre mondiale, ils sont maintenant pratiquement complètement abandonnés.

2. CONSTITUTION DU MÉLANGE CARBURÉ

Le carburant ne peut brûler qu'en présence d'oxygène. Il sera donc mélangé à de l'air avant le déclenchement de la combustion et il est logique de s'interroger sur l'influence que peut avoir le dosage du mélange air-carburant ou mélange carburé sur les performances du moteur à combustion. Celles-ci ne sont pas non plus indifférentes à la façon dont la combustion est réalisée. Le couple disponible sur l'arbre (et par conséquent la puissance développée) est fonction non seulement de la valeur absolue de la poussée obtenue sur le piston, mais aussi de la rapidité avec laquelle cette poussée atteint sa valeur maximale.

Il faut donc, d'une part, que la combustion du mélange carburé dégage une aussi grande quantité de chaleur que possible (choix du carburant et remplissage du moteur) et, d'autre part, qu'elle se réalise aussi complètement que possible dans un temps qui varie avec la vitesse de rotation du moteur, mais qui, en tout état de cause, restera le plus souvent très inférieur au millième de seconde.

Outre une *richesse* adéquate qui influencera le rendement de la transformation d'énergie, il faut donc s'attacher à donner au mélange une *homogénéité* et un état physique aussi proche que possible de l'*état gazeux*.

L'obtention de ces deux qualités met en cause les conditions de réalisation du mélange mais aussi, éventuellement, celle de son transport jusqu'aux cylindres à travers les tuyauteries d'admission. Cette obtention est d'autant plus facile que la vitesse de passage du mélange est plus grande (pulvérisation des carburants liquides et brassage) et que la température d'admission combat plus efficacement le refroidissement provoqué par l'évaporation spontanée des parties de carburants les plus volatiles.

Le réchauffement d'une admission ne doit cependant pas dépasser le stade au-delà duquel il provoquerait une perte importante de performances par diminution de la masse volumique du mélange fourni aux cylindres.

3. LE CARBURATEUR

Bien qu'il ne soit pas le seul appareil utilisable pour la fourniture d'un mélange d'air et d'essence au moteur, c'est l'un des plus anciens et il reste, actuellement, le plus employé.

Bien que son influence sur la préparation du mélange ne soit pas négligeable, notamment en ce qui concerne les qualités d'homogénéité et l'état gazeux, le carburateur a pour rôle essentiel d'assurer, en toutes circonstances, la fourniture au moteur d'une combinaison d'air et d'essence dont le *dosage* soit aussi voisin que possible de la valeur nécessaire.

3.1. Le dosage. — En considérant seulement le problème de la combustion pure et simple du carburant et en partant d'un seul des constituants d'une essence, l'heptane, de formule chimique C_7H_{16}, il est facile d'établir l'équation chimique correspondant à la combustion :

$$C_7H_{16} + 11O_2 \rightarrow = 7\,CO_2 + 8\,H_2O$$

Les masses atomiques du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène étant respectivement C = 12, H = 1 et O = 16, la combustion de 100 g d'heptane exige 352 g d'oxygène, c'est-à-dire environ 1 500 g d'air, ce qui conduit au dosage habituel de 1 g d'essence pour 15 g d'air (on dit alors que le mélange est de *richesse unité*).

L'expérience permet cependant de constater qu'une variation de richesse à vitesse de rotation et à remplissage du moteur constants entraîne une variation de puissance.

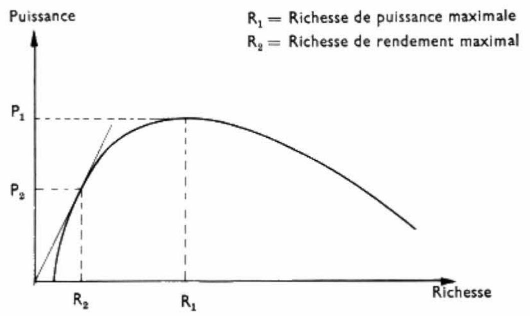


Fig. X-1 — Puissance en fonction de la richesse à vitesse et remplissage constants

La relation entre ces deux caractéristiques se traduit par la courbe représentée figure X-1.

Cette courbe montre bien que pour chaque vitesse de rotation possible du moteur, et à l'intérieur des richesses limites au-delà desquelles la combustion devient impossible, il existe deux richesses remarquables : celle matérialisée en R_1 qui est la première à partir de laquelle il est possible d'obtenir la *puissance maximale* du moteur correspondant à la vitesse de rotation considérée et celle matérialisée en R_2 réalisant le meilleur rapport possible entre la richesse et la puissance correspondante et qui, pour cette raison, est dite richesse de *rendement maximal.*

Toujours expérimentalement, on a pu déterminer que la valeur R_1 de la richesse de puissance maximale est d'environ 1,2 ce qui correspond à un dosage de 1 g d'essence pour 12,5 g d'air alors que la richesse de rendement maximal se situe aux alentours de 0,9 (dosage de l'ordre de 1 g d'essence pour 17 à 18 g d'air.)

On voit ainsi le caractère très théorique du dosage $\frac{1}{15}$ (mélange de richesse unité) en même temps que se trouvent matérialisées les difficultés à surmonter avec le carburateur, la nécessité d'obtenir du moteur sa puissance maximale quand il en est besoin ne dispensant pas de l'obligation de rechercher le meilleur rendement possible en toutes circonstances.

3.2. Le carburateur élémentaire. — Il groupe les organes indispensables à la réalisation simple d'un mélange d'air et d'essence (fig. X-2). Il comprend donc au minimum :

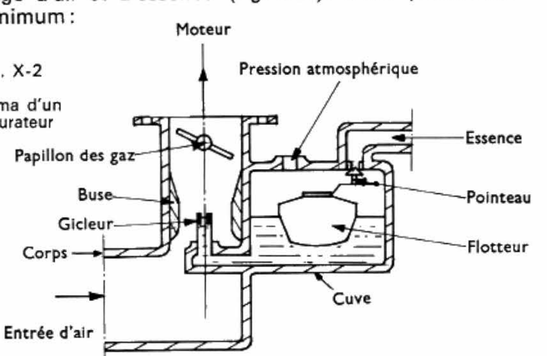


Fig. X-2
Schéma d'un carburateur

— *Un corps :* prolongement naturel de la tuyauterie d'admission et assurant un débit d'air en rapport avec les besoins du moteur à sa vitesse de rotation la plus élevée. À l'extrémité de ce corps, côté tuyauterie d'admission, se place le papillon des gaz dont le rôle est de donner au conducteur la possibilité d'agir sur le remplissage du moteur.

— *Une buse* ou *ajutage de Venturi,* placée à l'intérieur du corps et dont la forme intérieure assure à la fois une mise en dépression importante de cette zone du carburateur et une augmentation de la vitesse de passage de l'air par rapport à celle atteinte dans le reste de la tuyauterie.

— *Un canal d'arrivée d'essence* qui débouche dans la zone de forte dépression créée par la buse et dont l'extrémité est équipée d'un *gicleur* dont le calibrage permet, en définitive, de déterminer le dosage du mélange carburé.

— *Une cuve à niveau constant,* équipée d'un système pointeau-flotteur, pour éviter que le débit du gicleur soit influencé par des variations de pression dans le système d'alimentation en essence du carburateur. La cuve à niveau constant comporte, à sa partie supérieure, une mise à l'air libre pour qu'il soit possible d'en extraire l'essence par dépression sur le gicleur.

Le moteur tournant et le papillon des gaz étant grand ouvert, l'aspiration créée dans le cylindre par le mouvement descendant du piston oblige l'air à y pénétrer. À travers le carburateur, en aval de la section étranglée de la buse, apparaît alors une dépression dont la valeur est liée à l'importance du débit d'air. Celle-ci agit au niveau du gicleur et la quantité d'essence prélevée correspond, d'une part, à l'intensité de ladite dépression et, d'autre part, au calibrage du gicleur. Pour un débit d'air déterminé, il est par conséquent possible de choisir un calibrage de gicleur tel que le débit d'essence corresponde au dosage désiré.

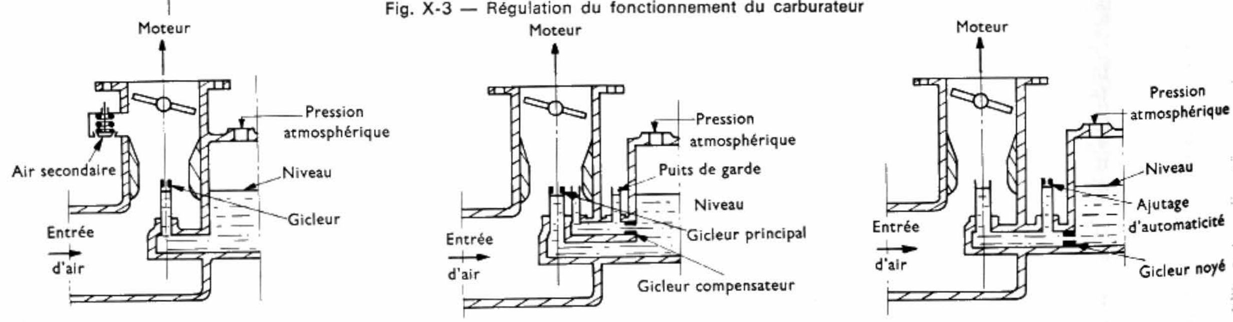
3.3. Automaticité (fig. X-3). — Un moteur tournant à une vitesse de rotation déterminée et dont l'ouverture de papillon de gaz est bien définie peut être équipé d'un carburateur élémentaire. Cependant, chaque fois que la vitesse de rotation, ou l'ouverture du papillon des gaz, ou les deux simultanément changent, le débit d'air à travers la buse et la dépression en aval de celle-ci se trouvent modifiés.

Or, pour une même variation de dépression, les débits d'air et d'essence varient dans le même sens mais dans des proportions différentes, le premier restant, à 10 % près, proportionnel à la racine carrée de la dépression (loi de Bernoulli), le second variant sensiblement selon une loi parabolique (loi de Delemet). Si la dépression tend à augmenter, le mélange tend à s'enrichir. Inversement il s'appauvrit chaque fois que la dépression diminue. Il faut donc donner au carburateur une automaticité suffisante pour remédier à cet inconvénient.

Différentes dispositions ont été employées, les trois principales étant basées sur les principes suivants :

3.3.1. Air secondaire. — Le carburateur est réglé de telle sorte qu'il donne le dosage correct aux faibles dépressions en amont du papillon. Il est alors possible de corriger la tendance à l'enrichissement qui apparaît quand la dépression augmente en ouvrant progressivement une entrée d'air débouchant en aval de la buse et assurant un débit variant avec la dépression (fig. X-3 a).

Fig. X-3 — Régulation du fonctionnement du carburateur



a) par air secondaire

b) par compensation

c) par gicleur noyé mis en dérivation

3.3.2. Compensation. — Le gicleur qui équipe le canal d'arrivée d'essence est choisi de telle sorte que le dosage correct soit atteint pour la dépression maximale dans la buse, c'est-à-dire au moment où la vitesse de rotation est la plus grande possible. Le mélange est alors d'autant plus pauvre que la dépression est plus éloignée du point de réglage optimal.

Le carburateur est doté d'un deuxième circuit, dit circuit compensateur, organisé de telle sorte que le débit de son gicleur d'essence soit insensible à la dépression dans la buse. Le mélange fourni par ce circuit s'appauvrit au fur et à mesure que la dépression augmente puisque seul son débit d'air augmente. Comme le circuit normal du carburateur s'enrichit dans le même temps, il suffit d'équilibrer ces deux tendances opposées pour obtenir un mélange total de dosage sensiblement constant (fig. X-3 b).

3.3.3. Gicleur noyé avec mise en dérivation. — Le gicleur étant placé sous le niveau constant débite, d'une part, sous l'effet de la dépression dans la buse et, d'autre part, sous l'influence de la hauteur d'essence dans la cuve. Ce dernier débit est constant et, par conséquent, son importance relative est beaucoup plus grande aux faibles allures qu'aux grandes vitesses de rotation.

Cependant, la tendance à l'enrichissement qui suit chaque augmentation de la dépression dans la buse subsiste. La mise en dérivation du système de giclage permet de ne transmettre au gicleur qu'un pourcentage réduit de cette dépression, la valeur de ce pourcentage étant fonction de la dimension de l'ajutage d'automaticité. La dépression ainsi amoindrie qui règne sur le gicleur reste cependant proportionnelle à celle provoquée dans la buse par le passage de l'air. Le débit d'essence peut donc évoluer avec elle tout en gardant une proportionnalité satisfaisante par rapport aux variations du débit d'air (fig. X-3 c).

3.4. Le ralenti. — Le dépression due à la buse ne peut exister que si le débit d'air y est suffisant. Au-dessous d'une fréquence de rotation qui dépend de l'organisation du carburateur mais qui, en tout état de cause, est rarement inférieure à 1 500 tr/mn, il devient pratiquement impossible de faire fonctionner le circuit normal du carburateur. Il serait anormal d'imposer au moteur une telle vitesse de rotation quand il tourne à vide et pour les vitesses inférieures il est par conséquent nécessaire de l'alimenter au moyen d'un circuit spécial dit *circuit de ralenti* (fig. X-4).

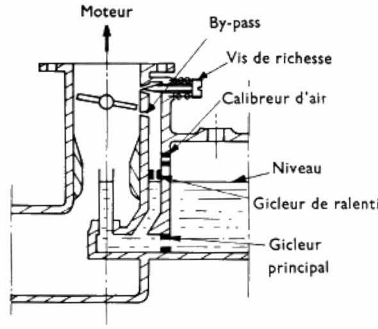


Fig. X-4

Circuit de ralenti

Celui-ci se compose d'un gicleur d'essence très généralement alimenté par une canalisation prise en dérivation sur le circuit du gicleur principal, en aval de celui-ci ; cette disposition permet de conserver le contrôle du débit total aux grandes allures au moyen du seul gicleur principal. Un calibreur d'air permet d'émulsionner l'essence débitée par le gicleur et de diriger vers la sortie de ralenti située en aval du papillon des gaz un mélange riche d'air et d'essence.

Une vis pointeau contrôle cette sortie de telle sorte qu'il soit possible de ramener à la richesse convenable le mélange qui se forme à ce niveau avec l'air circulant autour du papillon des gaz.

Au cours de l'accélération qui suit normalement l'utilisation du ralenti, le papillon découvre un ou plusieurs orifices de progression, généralement appelés *by-pass*, qui permettent de continuer à alimenter le moteur avec un mélange approprié jusqu'à la vitesse à laquelle se produit l'amorçage du gicleur principal.

3.5. Le départ à froid. — Le problème posé par la mise en route d'un moteur froid se ramène ici à celui de réaliser un mélange carburé combustible pendant que le moteur est entraîné extérieurement. Les conditions d'évaporation du carburant sont alors les plus mauvaises possibles (absence de dépression régulière, faible débit dans la tuyauterie d'admission et, par conséquent, mauvaise pulvérisation, absence complète de réchauffage).

Un enrichissement important du mélange réalisé par le carburateur permet de faire arriver aux cylindres un mélange gazeux malgré la perte par condensation d'une grande partie du carburant en cours de transport (bien entendu ce carburant doit être suffisamment volatil).

Cependant, aussitôt la mise en route du moteur obtenue, les conditions propres à réaliser l'état gazeux se trouvent rapidement améliorées. Il faut alors réduire la richesse du mélange fourni, faute de quoi le moteur calerait par excès d'essence.

Les dispositifs ajoutés au carburateur pour assurer le départ à froid tiennent compte de ces deux aspects du problème à résoudre.

3.5.1. Le starter. — C'est un circuit auxiliaire ajouté au carburateur principal et comportant une réserve d'essence séparée de la cuve à niveau constant par le gicleur d'essence du starter. Un gicleur d'air en communication avec l'extérieur assure l'alimentation en air en quantité suffisante afin de donner au moteur le remplissage indispensable pour obtenir la combustion et, par suite, une détente efficace.

Les deux circuits se rejoignent dans un boîtier de starter où, par l'intermédiaire d'un canal de grande dimension, ils sont mis en communication avec la tuyauterie d'admission en aval du papillon des gaz. Une glace permet d'isoler ou de mettre en service le système en présentant devant les canalisations utilisées soit une partie pleine, soit des orifices convenablement ajourés (fig. X-5).

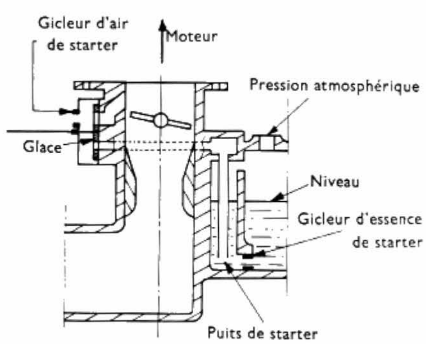


Fig. X-5

Starter

Le moteur entraîné par le démarreur n'a qu'une faible vitesse de rotation, ses admissions sont relativement espacées (une centaine par minute dans de bonnes conditions) et l'essence qu'il puise dans la réserve grâce à une canalisation de grande section est aussitôt renouvelée par la cuve à niveau constant. Dès la mise en route, la vitesse de rotation s'accroît et le nombre d'admissions atteint 500 à 600 par minute ; la demande en essence augmente mais la mise à l'air libre de la réserve empêche la dépression de se manifester au niveau du gicleur dont le débit n'augmente pas et se substitue à celui de la canalisation. En même temps, la demande en air a augmenté mais rien n'empêche le gicleur spécialisé d'y satisfaire. Ces deux tendances aboutissent à l'appauvrissement souhaité.

3.5.2. Le volet de départ. — En fermant l'entrée d'air du carburateur pendant la tentative de mise en route et en entrebâillant le papillon des gaz il devient possible d'appliquer au circuit principal une dépression suffisante pour en extraire de l'essence. La richesse du mélange obtenue avec l'air que le volet de départ laisse passer, dépend de la résistance à l'entrebâillement de ce dernier. Un volet de départ est donc généralement excentré sur son axe de

rotation de façon que la dépression du moteur tende à l'ouvrir mais il est en même temps équipé d'un ressort qui s'oppose à cet effort. C'est l'équilibre entre l'influence de l'excentrage et celle du ressort qui conditionne le succès du départ et l'intensité de l'appauvrissement après la mise en route.

3.6. La mise en action. — C'est la période qui sépare le moment de la mise en route du moteur de celui où il a atteint sa température normale de fonctionnement.

Pour pouvoir utiliser le moteur sans difficultés pendant la mise en action, même à des charges raisonnables, il est souvent nécessaire de lui fournir un mélange légèrement plus riche que celui du circuit principal et ce, d'autant plus que le rendement en utilisation normale aura été plus recherché.

Les systèmes de départ à froid comportent, quand ils sont à commande manuelle, des positions intermédiaires de mise en service sur lesquelles l'utilisateur peut s'arrêter en cours de fermeture pendant le temps nécessaire à la montée en température du moteur. Quand ils sont à commande automatique ils réalisent d'eux-mêmes une diminution progressive de la richesse et de la vitesse de rotation du moteur en fonction de sa mise en température.

3.7. La reprise.— Effectuer une reprise, c'est passer brutalement d'une position de papillon des gaz relativement fermée à la position grande ouverte dite « plein gaz ». Le moteur accélérant, la vitesse de l'air augmente. L'essence, plus lourde, ne peut s'écouler plus vite que si la dépression dans la buse augmente vite, c'est-à-dire en réalité si la dimension de buse utilisée est faible.

De nos jours, il est fréquent que les moteurs soient équipés de buses relativement importantes pour leur cylindrée (recherche de puissance à régime élevé). Une accélération rapide provoque alors généralement un appauvrissement temporaire du mélange dû à un décalage entre l'augmentation du débit d'air et celle du débit d'essence. En attendant que le circuit principal ait retrouvé son équilibre, il faut obliger l'essence à parvenir en quantité suffisante.

La *pompe de reprise* d'un carburateur a donc pour rôle de combattre un appauvrissement momentané. Elle est conçue pour fournir, pendant un temps déterminé, une quantité d'essence proportionnée aux besoins du moteur. Elle peut agir sur l'essence, soit par l'intermédiaire d'une membrane (fig. X-6), soit par l'intermédiaire d'un piston mais dans les deux cas elle comporte :

— *Un réglage de course* qui permet de régler le déplacement du piston ou de la membrane pendant le fonctionnement de la pompe et par suite la quantité d'essence déplacée.

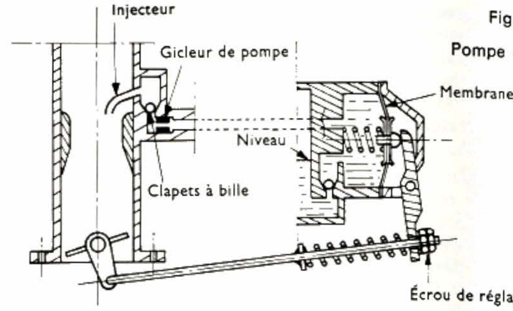


Fig. X-6
Pompe de reprise

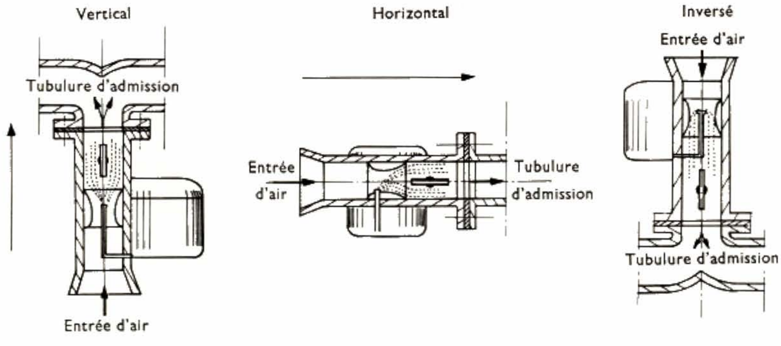


Fig. X-7
Orientation des carburateurs (*Solex*)

— *Un calibrage de débit* qui, placé à la sortie du circuit de pompe, fixe le temps que l'essence délivrée met à s'écouler.

Le réglage de course se fait le plus souvent par un réglage de la longueur de tringlerie entre piston ou membrane et papillon. Quant au temps d'écoulement, il est réglé par un gicleur spécial, dit généralement gicleur de pompe, ou même au niveau de l'injecteur de pompe lui-même.

3.8. Les correcteurs de richesse. — Le paragraphe consacré au dosage a permis de constater que, si le fonctionnement du moteur en puissance exige une richesse relativement importante, il reste cependant possible de réduire cette richesse dans des proportions intéressantes toutes les fois que le conducteur du véhicule n'en exige pas les performances maximales.

Si le circuit principal du carburateur comporte une automaticité lui assurant facilement un fonctionnement correct en plein gaz, il n'est pas toujours possible d'en obtenir, avec les mêmes éléments de réglage, le rendement le meilleur en utilisation à puissance réduite.

Dans un grand nombre de carburateurs modernes on trouve donc des circuits complémentaires correcteurs de richesse. Leur but essentiel est de permettre un réglage pauvre du circuit principal chaque fois que les circonstances d'utilisation du moteur lui permettent de s'en contenter, en assurant le réenrichissement nécessaire à l'obtention de la puissance quand le conducteur l'exige.

4. STRUCTURE GÉNÉRALE DU CARBURATEUR

Le carburateur est essentiellement composé d'une cuve avec couvercle greffée sur un corps dans lequel débouchent les différents circuits, l'ensemble comportant les formes extérieures nécessaires pour recevoir différents accessoires complémentaires.

Un modèle de carburateur moderne est présenté ci-après mais, avant d'entrer dans le détail de sa description, il apparaît intéressant de développer les considérations qui peuvent conduire à donner à un appareil telle structure particulière, en fonction de l'application à laquelle il est destiné.

4.1. Orientation des carburateurs (fig. X-7). — Aux origines de l'automobile, le carburateur était alimenté en essence par gravité. Il était donc placé très bas et l'air y circulait de bas en haut (*carburateur vertical*).

Cependant, il en résultait une certaine difficulté pour entretenir, contre les effets de la pesanteur, un mouvement d'essence vers les entrées des cylindres. Pour que cette gêne ne s'oppose pas à l'amélioration de la nervosité des moteurs, les spécialistes ont dessiné des *carburateurs horizontaux* avec lesquels il était encore possible d'utiliser des réservoirs en charge tout en s'affranchissant de l'obligation de hisser, jusqu'aux cylindres, l'essence fournie par le gicleur.

Enfin, la généralisation des systèmes d'alimentation par pompe a permis, sans inconvénient, de placer le carburateur plus haut que le réservoir. Il a pu alors dominer les cylindres. Le sens de circulation de la veine gazeuse étant

inversée par rapport à celui du carburateur d'origine, l'appareil a pris le nom de *carburateur inversé*.

C'est le plus utilisé actuellement, les carburateurs horizontaux trouvant cependant une certaine faveur auprès des constructeurs de voitures à lignes basses dans lesquelles l'espace disponible en hauteur dans le compartiment moteur est extrêmement réduit.

4.2. Carburateurs multicorps. — Le volume intérieur du corps d'un carburateur est naturellement choisi en fonction des besoins en air du moteur à son régime maximal. Si la cylindrée est importante ou si la vitesse maximale prévue est très élevée, il faut donc utiliser un carburateur de grande dimension avec une buse de diamètre intérieur important.

Dans ces conditions, il peut devenir difficile d'obtenir, dans les bas régimes d'utilisation du moteur, une dépression suffisante pour faire fonctionner le circuit principal. Il est donc préférable d'employer un carburateur à plusieurs corps, chacun d'eux étant plus petit et permettant, dans les bas régimes, une action normale sur l'essence, la somme des débits maximaux possibles étant déterminée de façon à satisfaire les exigences du moteur au plein gaz.

Deux techniques de réalisation sont alors possibles.

4.3. Autres carburateurs spéciaux

4.3.1. Carburateurs tous terrains. — Il s'agit essentiellement d'appareils dont le niveau constant est obtenu de telle façon qu'il soit possible de conserver au moteur une alimentation en essence satisfaisante malgré d'importantes inclinaisons du véhicule (avec certains types de carburateurs tous terrains, elles peuvent aller jusqu'à 45°).

On emploie généralement une cuve en deux parties ; dans chacune d'elles se trouve un flotteur en forme de galette circulaire et placé verticalement. Les deux galettes sont parallèles au plan de symétrie du carburateur et reliées par une lamelle agissant sur le pointeau. La quantité totale de flotteurs immergée et, par conséquent, la poussée sur le pointeau, restent constantes malgré les variations d'inclinaison.

Les différents circuits du carburateur sont alimentés en essence aussi bas que possible sous le niveau et au voisinage de l'axe de symétrie de la cuve de façon à éviter un déjaugeage.

4.3.2. Carburateurs à régulateur (fig. X-8). — Ce sont des appareils conçus pour que le moteur ne puisse dépasser une vitesse de rotation déterminée.

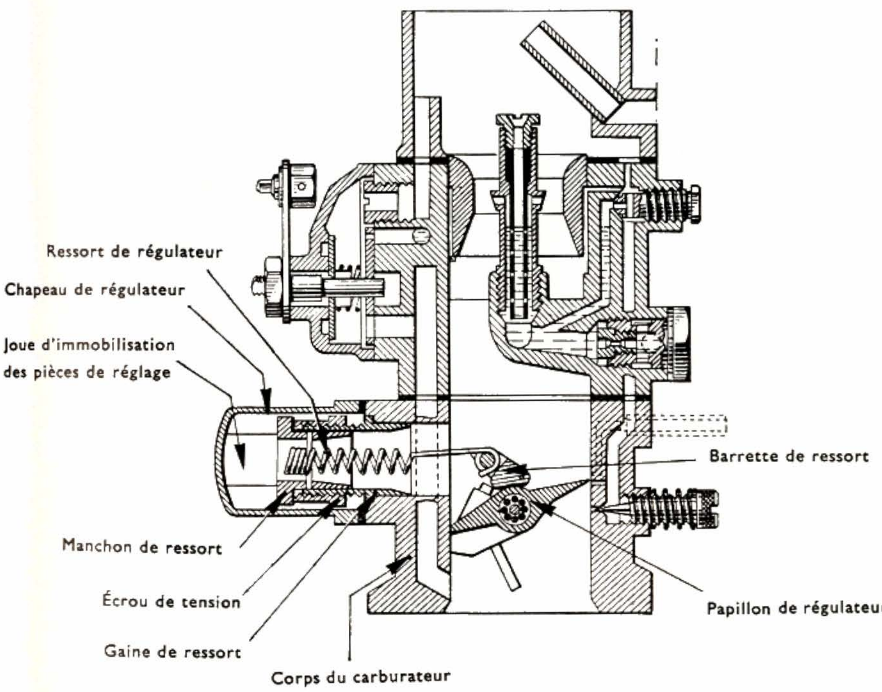


Fig. X-8

Carburateur à régulateur (*Solex*)

4.2.1. Carburateur double corps. — Deux carburateurs complets sont greffés sur une même cuve à niveau constant. Ils ont tous les deux les mêmes organes et, par conséquent, les mêmes possibilités. Les papillons des gaz sont reliés à une seule commande qui les manœuvre simultanément. Les deux corps sont donc utilisables soit ensemble pour alimenter successivement les différents cylindres, soit séparément, l'un pour la moitié des cylindres, l'autre pour l'autre moitié.

4.2.2. Carburateur « compound ». — Un carburateur complet, de dimension moyenne, est associé à un corps comprenant essentiellement un papillon des gaz, une buse et un circuit d'essence. La commande des papillons (celui du carburateur et celui du corps associé) est décalée de telle sorte que, lors d'une accélération, le premier corps s'ouvre d'abord, le second n'intervenant qu'ensuite, lorsque le moteur a atteint un régime suffisant pour ne plus être gêné par une trop grande dimension d'aspiration. Les deux corps d'un tel carburateur doivent toujours être reliés à chacun des cylindres dont l'ensemble a la charge.

L'axe de rotation du papillon des gaz d'un carburateur de ce type est généralement excentré de telle sorte que le débit d'air provoqué par l'aspiration du moteur crée un couple de fermeture sur le papillon. Celui-ci est soumis à un couple d'ouverture exercé par un ressort accroché, d'une part, au papillon et, d'autre part, à la paroi du carburateur.

Le tarage du ressort conditionne l'inclinaison pour laquelle ces forces opposées s'équilibrent et fixe, par conséquent, la vitesse de rotation maximale qu'il est possible d'atteindre. Le système de réglage du ressort comporte les dispositifs nécessaires pour lui assurer une souplesse propre à autoriser le papillon à se refermer chaque fois que la charge du moteur diminue de telle sorte que la vitesse de régulation reste aussi indépendante que possible de ladite charge.

Les carburateurs à régulateur ont été très employés sur les poids lourds à moteur à essence (aujourd'hui, ces véhicules sont presque toujours équipés de moteurs Diesel). La gamme des fourgons à essence de poids moyen offre cependant encore un champ d'utilisation assez vaste aux appareils à régulateur.

4.4. Givrage. — L'évaporation d'un liquide s'accompagne d'une absorption de chaleur. À l'intérieur du carburateur, au fur et à mesure qu'elle s'évapore, l'essence peut donc refroidir de façon importante la masse d'air qui l'entraîne. La grande volatilité des essences utilisées actuellement en automobile favorise les refroidissements intenses. Si la température de l'air d'admission est basse, elle peut donc facilement descendre en dessous de 0 °C à l'intérieur du carburateur et provoquer ainsi la congélation de la vapeur d'eau contenue dans l'air. Les parois intérieures du carburateur se couvrent de glace et les sorties d'essence s'en trouvent obstruées.

Il est possible de combattre la formation du givre par des apports de chaleur au niveau de l'air d'admission (filtre à air organisé spécialement pour prélever une partie de l'air au voisinage des tuyauteries d'échappement) ou au niveau des parois du carburateur (V. § 5.2).

On peut encore incorporer au carburant des additifs appropriés. Les uns dits « tensio-actifs » laissent le givre se former mais le rendent incapable d'adhérer aux parois, les autres forment avec l'humidité de l'air un mélange dont le point de congélation est très inférieur à 0 °C.

4.5. Percolation. — Ce phénomène est, lui aussi, lié à la volatilité importante des carburants actuels et, bien entendu, au niveau atteint par la température sous capot pendant le fonctionnement du véhicule. Il se traduit par la mise en ébullition de l'essence contenue dans l'ensemble des circuits du carburateur et aboutit généralement à un débordement d'essence par les différentes arrivées de ces circuits.

Le plus souvent la percolation se produit au moment où l'on arrête un moteur chaud; cela est particulièrement gênant si l'on désire remettre le moteur en route à bref délai du fait de l'excès de richesse qu'elle entraîne.

Elle peut aussi se produire dans des conditions de circulation difficiles (embouteillages, escalade d'un col de haute montagne) et peut même provoquer, toujours par excès de richesse, le calage du moteur au ralenti. Pour éviter ces inconvénients, il convient :

— de donner au carburateur une structure telle que la chaleur des tuyauteries d'admission se transmette difficilement à la cuve à niveau constant;

— d'isoler, autant que faire se peut, le carburateur du rayonnement des sources de chaleur environnantes;

— de prévoir une ventilation sous capot aussi large que possible.

Il ne faut cependant pas perdre de vue que toutes les solutions propres à refroidir le carburateur favorisent la formation du givrage.

5. MONOGRAPHIE DE CARBURATEUR

Bien des types de carburateurs créés depuis l'origine de l'automobile ont maintenant complètement disparu. Les solutions adoptées par les fabricants actuels sont souvent cependant des applications des mêmes principes fondamentaux. Le modèle décrit ci-après comporte la plupart des réponses aux problèmes posés plus haut.

Carburateur Solex 32 DITA-3 (fig. X-9). — Ce carburateur inversé, à pompe de reprise à commande mécanique et volet de départ automatique, présente une structure extérieure étudiée en vue d'atténuer les effets de givrage et de percolation dans toute la mesure possible.

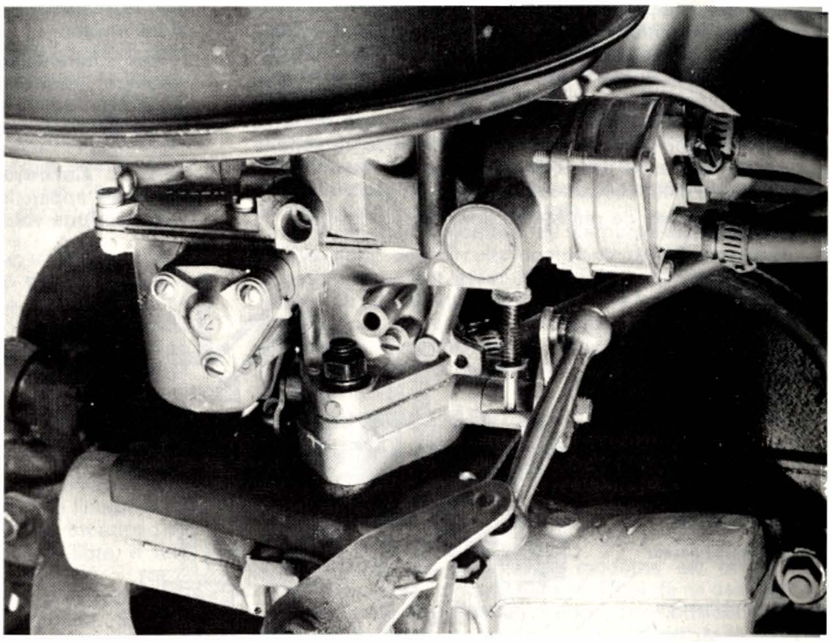


Fig. X-9

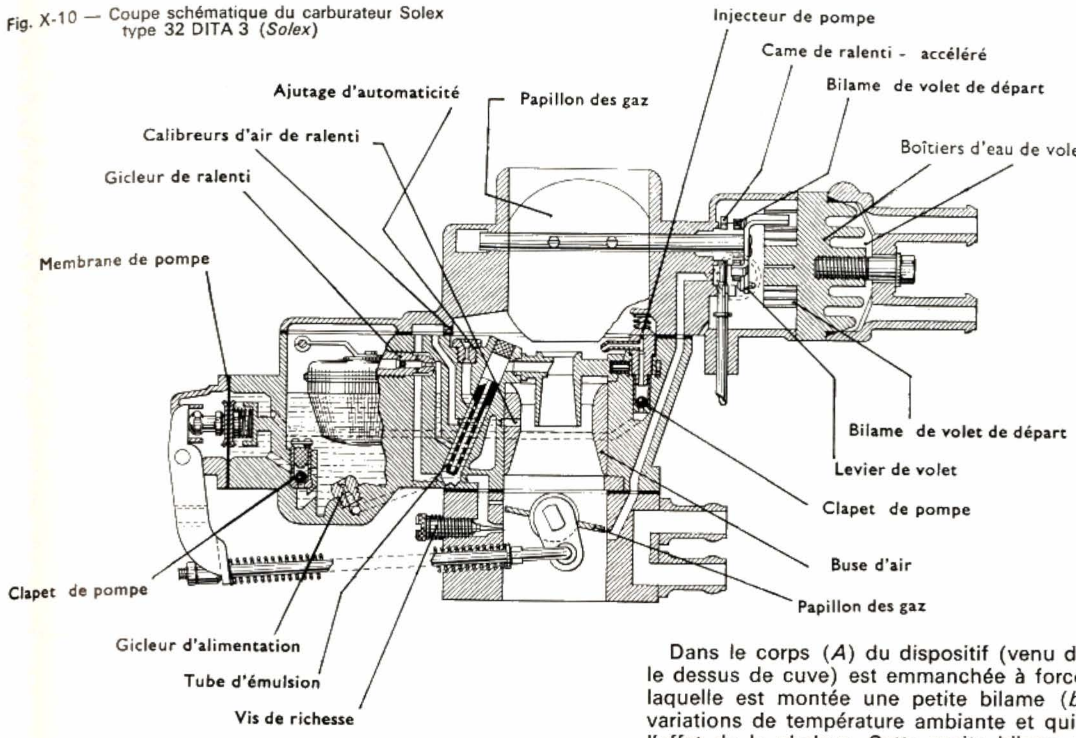
Montage d'un carburateur Solex type 32 DITA 3 (*Solex*)

La partie du corps à l'intérieur de laquelle se trouvent le papillon des gaz et les sorties de ralenti est séparée de la partie supérieure par un joint thermique épais. Elle peut donc être efficacement protégée contre le givrage sans que la chaleur qu'elle reçoit risque de se transmettre aux autres parties du carburateur. Quant à la cuve à niveau constant, elle n'est raccordée au corps que par la section minimale nécessaire pour assurer le passage des différents circuits, de façon à limiter encore les échanges de chaleur possibles. Le boîtier de réchauffage des bilames de commande du système de départ automatique a été, lui-même, placé sur le couvercle du côté opposé à la cuve.

5.1. Marche normale (fig. X-10). — Le circuit principal est du type à gicleur noyé avec mise en dérivation contrôlée par un ajutage d'automaticité. Il comporte donc un *gicleur principal* (*Gg*) monté à l'intérieur de la cuve sous le niveau constant et alimentant un puits de giclage d'où le moteur extrait l'essence, grâce à la dépression créée par le débit d'air d'admission dans le diffuseur. L'*ajutage d'automaticité* (*a*) communique avec l'intérieur du puits de giclage vers sa partie supérieure. À l'intérieur de ce puits se trouve également un *tube d'émulsion* (*s*) dont les orifices étagés latéraux permettent le dénoyage du puits au cours de l'accélération. La baisse du niveau de l'essence dans le puits découvre progressivement les trous qui assurent ainsi une augmentation régulière de l'influence de la mise en dérivation. Le *diffuseur* placé sur le bec de giclage, à l'intérieur de la *buse* (*K*), permet de conserver, aux petites allures du moteur, une vitesse d'air suffisante sur la sortie d'essence de façon à obtenir un minimum de pulvérisation.

L'inclinaison donnée au puits de giclage et l'emplacement de la mise en dérivation font que les tampons de vapeur, qui peuvent se former au niveau du gicleur sous l'effet de la température importante qui règne dans le

Fig. X-10 — Coupe schématique du carburateur Solex type 32 DITA 3 (*Solex*)



compartiment moteur après une période de fonctionnement, s'évacuent par l'ajutage d'automaticité. La poussée qu'ils créent sur l'essence en allant vers la surface n'aboutit pas à des écoulements intempestifs de combustible vers la tubulure d'admission. Les remises en route du moteur chaud s'en trouvent grandement facilitées.

5.2. Ralenti. — Le *gicleur de ralenti* (*g*) est alimenté en essence par une dérivation prise sur le circuit principal en aval du gicleur de marche. Les *calibreurs d'air* (u_1 et u_2) assurent l'émulsion de l'essence fournie avant son transport vers la *vis de richesse* (*W*). Le *by-pass* placé légèrement au-dessus de la position occupée au ralenti par le papillon des gaz (*V*) permet d'obtenir, par l'intermédiaire du circuit de ralenti, un mélange suffisamment riche au début de l'accélération en attendant l'amorçage du circuit principal. Pour éviter le givrage, un circuit d'eau, alimenté par une dérivation du circuit de refroidissement du moteur, maintient la paroi intérieure du corps au voisinage des sorties de ralenti à une température suffisante.

5.3. Le volet de départ automatique (fig. X-11). — Pour obtenir du système de départ une richesse suffisante, aussi bien au moment de la mise en route que pendant toute la durée de la mise en action, le fonctionnement du dispositif est lié à la montée en température du liquide de refroidissement du moteur. Pour ce faire, les deux *bilames*, dont le rôle est détaillé ci-après, sont réchauffées par la conductibilité du *corps* (7) monté sur le *boîtier* (8) dans lequel circule le liquide dérivé de la culasse du moteur.

Dans l'entrée d'air principale du carburateur, un volet (V_1) excentré est monté sur un axe mobile (1) comportant à une extrémité un levier (2) rivé. La bilame (*B*), maintenue fixe en son centre sur le support (*D*) du corps de boîtier (7) et dont l'extrémité libre est attelée au doigt (E_1) du levier (2), détermine les différentes positions du volet (V_1) en fonction de la température de l'eau de refroidissement du moteur. Le levier (2) est en liaison avec un piston (3) soumis à la dépression qui règne dans la tubulure d'admission pour contraindre, dès que le lancement du moteur est obtenu, le volet (V_1) à s'ouvrir autant que le lui permettra l'opposition entre la résistance de la bilame et l'action de la dépression sur le piston dans lequel sont ménagées les fuites (*U*) et (U_1).

Dans le corps (*A*) du dispositif (venu de fonderie avec le dessus de cuve) est emmanchée à force une bague sur laquelle est montée une petite bilame (*b*) sensible aux variations de température ambiante et qui s'enroule sous l'effet de la chaleur. Cette petite bilame commande une came étagée (*C*), montée libre sur la bague précitée, dont chaque cran correspond à une valeur de température déterminée. Le rôle de cette came (*C*) est de régler la position d'ouverture du papillon des gaz (*V*) (*ouverture positive*) pour faire varier suivant la température de l'eau du moteur et suivant les besoins la valeur de la dépression agissant sur le système de giclage principal en même temps que le régime de ralenti accéléré.

La conjugaison nécessaire entre la came (*C*) et le papillon des gaz (*V*) est réalisée au moyen de la tringle de liaison (5) en contact direct, d'un côté avec les crans de la came (*C*), de l'autre avec le levier intermédiaire (4)

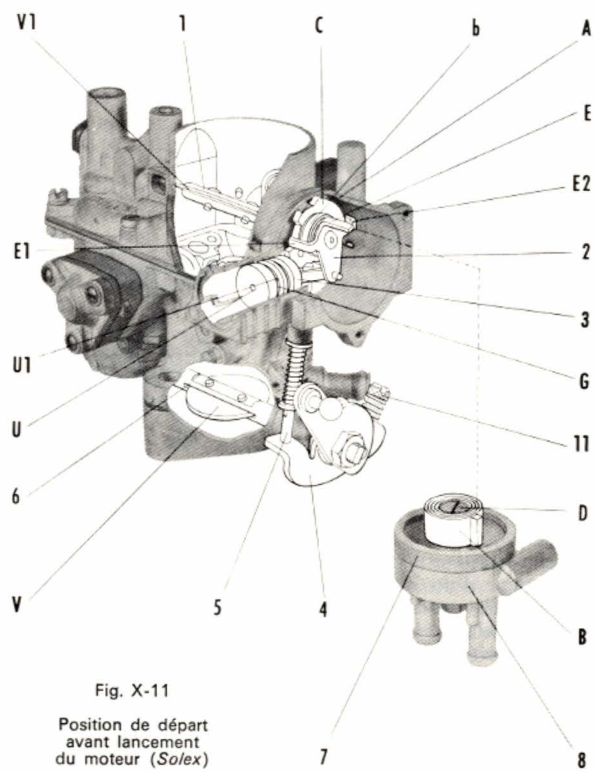


Fig. X-11

Position de départ avant lancement du moteur (*Solex*)

monté libre sur l'axe (6) du papillon (*V*). Notons que, lors de la fermeture du volet, la came (*C*) est entraînée mécaniquement par le doigt (E_1) du levier (2) prenant ainsi une position qui ne pourrait être atteinte au moyen de la petite bilame (*b*) dans le cas de températures ambiantes supérieures à environ + 5 °C. On obtient l'ouverture positive nécessaire en procédant au réglage du ralenti à vide (régime 650 tr/mn) sur moteur chaud ; il faut ajuster la position de la vis butée de ralenti (11) (et de la vis de richesse pour que le dosage du mélange carburé soit optimal).

Il est à noter que le réchauffage de la petite bilame (*b*) est beaucoup moins important que celui de la bilame (*B*) qui se trouve directement en contact avec le corps (7). Pour éviter un retour trop lent au ralenti, le doigt (E_2) du levier (2), directement actionné par la bilame (*B*) agit sur la petite bilame (*b*) dans le sens de l'escamotage de la came (*C*). Au moment où le moteur froid va être lancé, les éléments occupent la position indiquée sur la figure X-11. La came (*C*) ayant été libérée a pris une position qui lui est imposée par la bilame (*b*) ou par le doigt (E_1) du levier (2) dans le cas d'une température ambiante supérieure à environ + 5 °C. Celui de ses crans qui se place en face de la tringle (5) détermine, par l'intermédiaire des leviers (16) et (4), l'ouverture positive du papillon des gaz.

Sous l'effet de la température ambiante, la bilame (*B*) provoque la fermeture du volet (V_1) en exerçant un effort d'autant plus grand que la température est plus basse. Lorsque, sous l'impulsion du démarreur, le moteur est entraîné, la dépression transmise d'aval en amont du papillon est relativement faible mais suffisante pour aspirer de l'essence dans le système de giclage principal du carburateur. Cette même dépression agissant sur le volet excentré (V_1) tend à l'ouvrir. Le piston (3), également soumis à la dépression aval, favorise ce mouvement.

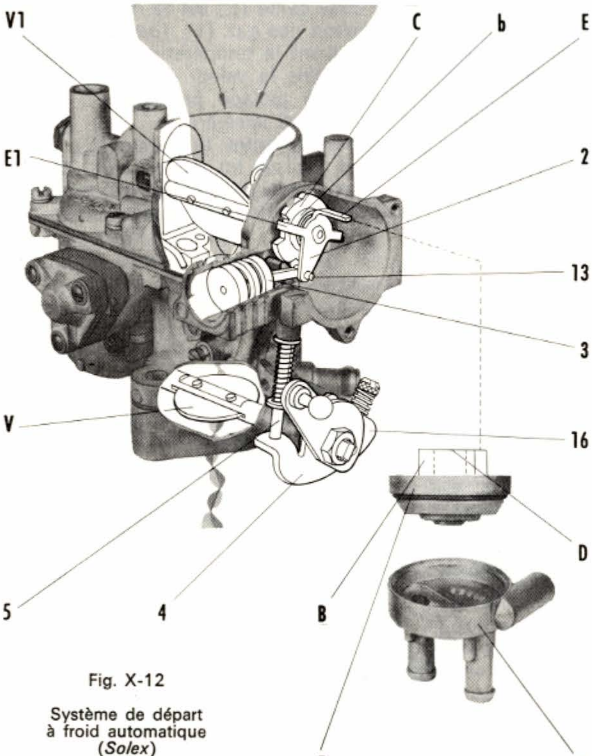


Fig. X-12

Système de départ à froid automatique (*Solex*)

Il en résulte un léger battement du volet (V_1) permettant le passage d'un faible volume d'air qui, avec l'essence aspirée à travers le système de giclage principal, forme un mélange de départ très riche. Le moteur lancé, la dépression dans la tubulure augmente avec le régime. Le piston (3) est attiré et provoque une ouverture partielle du volet de départ (V_1) donc un appauvrissement du mélange qui permet au moteur de continuer à tourner sans risque de calage par excès (fig. X-12).

Au fur et à mesure qu'elle s'échauffe, la bilame (*B*) se détend et s'enroule sur son axe (*D*). Dans sa rotation elle entraîne le doigt (E_2) du levier (2) solidaire du volet (V_1) permettant ainsi à ce dernier de s'ouvrir davantage. La dépression sur le système de giclage principal décroît donc, entraînant une diminution du débit de carburant.

Parallèlement, la petite bilame (*b*), entraînée par l'ouverture du volet, provoque un déplacement angulaire de la came (*C*) et ramène progressivement le papillon des gaz (*V*) en position de ralenti normal. Quand le moteur a atteint sa température normale de fonctionnement, les éléments constitutifs du système de départ se trouvent respectivement dans la position représentée sur la figure X-13. Le volet (V_1) qui s'est ouvert en grand a, par

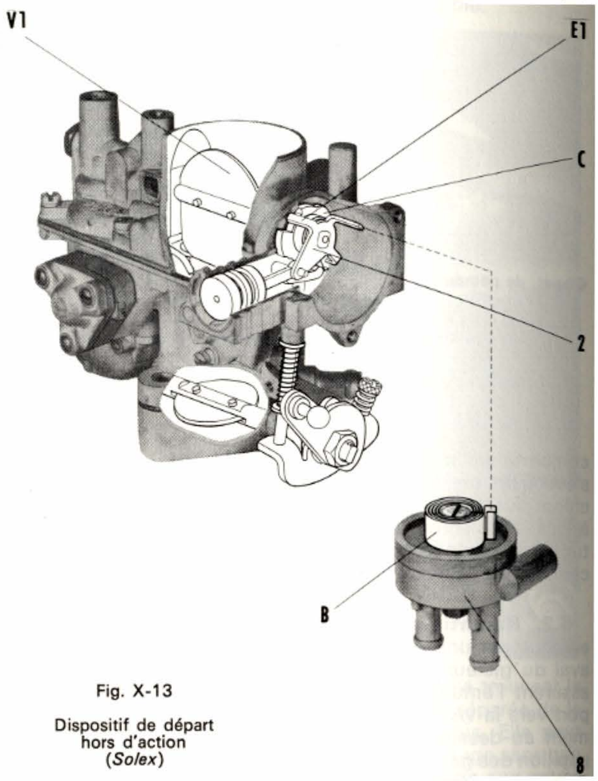


Fig. X-13

Dispositif de départ hors d'action (*Solex*)

l'intermédiaire du doigt (E_1) du levier (2), entraîné la came (*C*) qui se trouve ainsi placée nécessairement au cran « ralenti ». Le dispositif de départ est alors hors d'action.

Remarques importantes :

1° Avant chaque mise en marche du moteur, il est indispensable d'armer le dispositif de départ en enfonçant la pédale d'accélérateur une fois d'au moins un tiers de sa course (puis on la relâche) ; ainsi on libère la came (*C*) verrouillée par l'action du système de rappel de l'accélérateur et on lui permet de prendre la position que lui impose la bilame (*b*) ou le doigt (E_1) du levier (2) en fonction de la température. C'est cette position de la came qui détermine l'ouverture du papillon (*V*).

2° Le moteur étant chaud, seule la circulation continue d'eau chaude dans le boîtier (8) maintient le volet de départ en position d'ouverture.

3° Le réglage du volet de départ automatique, qui consiste essentiellement en une opération d'étalonnage de la bilame (*B*) en fonction de la température ambiante, est réalisé une fois pour toutes en usine. Il est concrétisé par deux repères placés l'un sur le corps et l'autre sur le boîtier du dispositif et qui doivent se trouver en correspondance.

5.4. La pompe de reprise. — Une *membrane* (V. fig. X-10) poussée, d'une part, par un ressort et, d'autre part, par un levier solidaire de l'axe de papillon par l'intermédiaire d'un renvoi et d'une tringle à ressort, assure l'injection d'essence au moment des accélérations brutales. La quantité d'essence fournie est fonction du déplacement

de la membrane et, par conséquent, de la longueur de la tringle qui relie le levier de pompe à la biellette solidaire de l'axe de papillon. Le réglage se fait en déterminant l'entrebâillement de papillon à partir duquel la membrane de pompe a réalisé son avance maximale possible.

Quant à la durée de l'injection elle est fonction du débit du calibrage de sortie donc ici du diamètre intérieur de l'extrémité du *tube injecteur* (*i*). L'injecteur permet d'orienter, de façon convenable, le jet d'essence précipité dans la veine gazeuse. Deux clapets à bille, l'un à l'entrée et l'autre à la sortie, permettent d'éviter, d'une part, de refouler de l'essence vers la cuve à niveau constant pendant la reprise, d'autre part, de faire entrer de l'air par les circuits de sortie, quand le retour au ralenti libère la membrane.

5.5. L'éconostat commandé. — La courbe présentée au paragraphe 3.1 a fait ressortir la difficulté qu'il pouvait y avoir à obtenir d'un carburateur le dosage donnant à la fois la meilleure puissance et le meilleur rendement. L'éconostat commandé est un dispositif qui permet de n'enrichir que les régimes d'utilisation voisins du « plein gaz » alors que le dosage nécessaire pour les utilisations à charge partielle est réalisé par le seul circuit principal (fig. X-14).

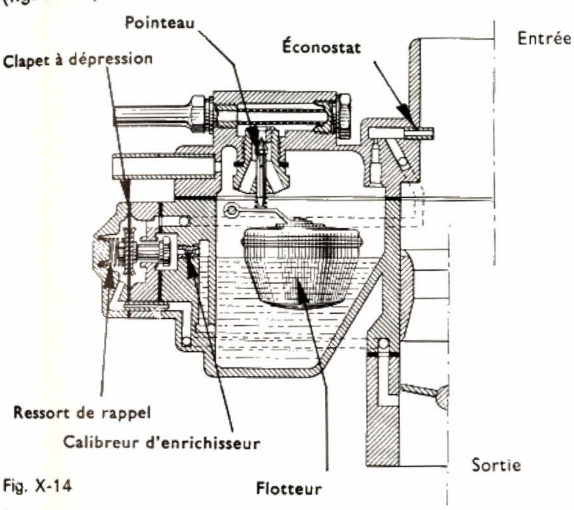


Fig. X-14

Éconostat commandé (*Solex*)

Un *clapet* contrôlé par une membrane est fermé chaque fois que la dépression en arrière de cette membrane est supérieure au tarage du ressort et ouvert dans le cas contraire. La dépression transmise à la membrane étant celle qui règne en aval du papillon des gaz, le clapet ne peut s'ouvrir que si le papillon des gaz est suffisamment ouvert. À ce moment, le débit d'air dans l'entrée d'air du carburateur crée sur la sortie du circuit une aspiration suffisante pour extraire, à travers le calibreur, de l'essence en provenance directe de la cuve à niveau constant. Dès que le papillon des gaz se referme, l'augmentation de dépression comprime le ressort et referme le clapet. Même si l'aspiration sur la sortie est encore importante, le circuit d'essence est ainsi obturé.

6. LE CARBURATEUR ET LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE (V. chap. 14)

Le développement même de l'automobile et les grandes concentrations auxquelles son utilisation intensive donne naissance en circulation urbaine ont conduit de nombreux pays à se préoccuper sérieusement de sa responsabilité en matière de pollution atmosphérique.

L'examen des exigences du moteur en matière de richesse du mélange carburé a conduit, en effet, à souligner l'impossibilité où l'on se trouve de lui fournir un mélange de richesse constante, ses performances étant tributaires non seulement de cette richesse mais aussi de l'état physique du mélange et de la façon dont la combustion s'y développe. Outre la vapeur d'eau et le gaz carbonique qui résultent de la transformation complète d'une partie de l'essence utilisée, les gaz d'échappement d'un moteur contiennent donc très souvent des hydrocarbures non transformés et toute la gamme des états intermédiaires par lesquels passent l'hydrogène et le carbone au cours de leur transformation en vapeur d'eau et en gaz carbonique.

Certains de ces composés et, en particulier, le *monoxyde de carbone* (CO) sont dangereux à faible dose pour l'organisme humain, bien qu'il ait la faculté de les éliminer lentement quand il n'en absorbe plus. Les États-Unis d'Amérique, le Japon et la plupart des pays d'Europe ont donc demandé aux constructeurs d'automobiles de limiter les taux d'émission pour chaque véhicule à des teneurs considérées comme des maximums admissibles compte tenu de la densité de la circulation urbaine. Les différentes législations déjà publiées s'attachent principalement à combattre les émissions d'oxyde de carbone et celles d'hydrocarbures imbrûlés et en fixent les teneurs à des taux indexés aux caractéristiques des véhicules classés selon leur masse en ordre de marche ou, dans certains pays, suivant leur consommation de carburant.

Puisqu'il s'agit essentiellement de diminuer les teneurs en corps non transformés, il faut mettre en œuvre toutes les techniques propres à améliorer la combustion. Dans ce domaine les études portent donc sur les formes de la chambre de combustion, sur les bienfaits d'une avance à l'allumage appropriée, sur la possibilité de stabiliser les températures d'admission, sur les interventions possibles au niveau des gaz d'échappement par adduction d'air frais en aval des soupapes pour permettre aux gaz encore très chauds de poursuivre leur combustion dans la tuyauterie, sur l'organisation de l'admission la plus propre à favoriser la bonne répartition aux cylindres d'un mélange aussi homogène que possible. Elles ne peuvent cependant pas négliger la responsabilité encourue par le carburateur dans le dosage du mélange.

À ce niveau et d'une façon générale, c'est dans la réalisation de mélanges pauvres en essence qu'il convient de chercher une solution, en gardant cependant à l'esprit que les hydrocarbures imbrûlés naissent à la fois des mélanges trop riches et des mélanges trop pauvres et que les oxydes d'azote se produisent avec des mélanges pauvres, alors que l'oxyde de carbone s'élimine essentiellement par la recherche des dosages pauvres. Un excès de rigueur contre l'oxyde de carbone peut donc entraîner une réapparition des hydrocarbures imbrûlés et la présence d'oxydes d'azote. Par ailleurs, d'importants défauts de fonctionnement accompagnent vite l'utilisation de mélanges trop pauvres.

Les essais imposés par les normalisations adoptées portent sur les ralentis, les fonctionnements à un régime stabilisé à différentes vitesses dont la plus grande est 50 km/h pour la norme dite européenne, les accélérations nécessaires pour atteindre, dans un temps déterminé, ces vitesses en partant du ralenti, les décélérations à effectuer, toujours dans un temps déterminé, pour revenir au ralenti. Sans différer dans leurs principes de base des solutions exposées plus haut, les carburateurs les plus récents tiennent compte de ces considérations dans le détail de leurs structures.

6.1. Ralenti - progression - amorçage. — Au ralenti proprement dit il faut obtenir une teneur en oxyde de carbone faible par rapport à celle qui résulte de l'emploi de la méthode de réglage traditionnelle, en conservant cependant une vitesse et une régularité de rotation convenables. De même, le transfert du ralenti à la marche normale, qui est déjà une opération délicate en carburation courante si l'on veut éviter les défauts de fonctionnement, prend toute sa valeur en dépollution, compte tenu des conditions normales de la circulation urbaine. La mise en place des by-pass, le contrôle de leur débit et les conditions de l'amorçage du circuit principal sont donc autant de problèmes à résoudre avec une précision absolue.

6.1.1. Ralenti et progression. — Au ralenti il est avantageux d'obtenir une fois pour toutes la fermeture quasi complète du papillon des gaz, en ajoutant au carburateur une canalisation d'air contournant le papillon et contrôlée

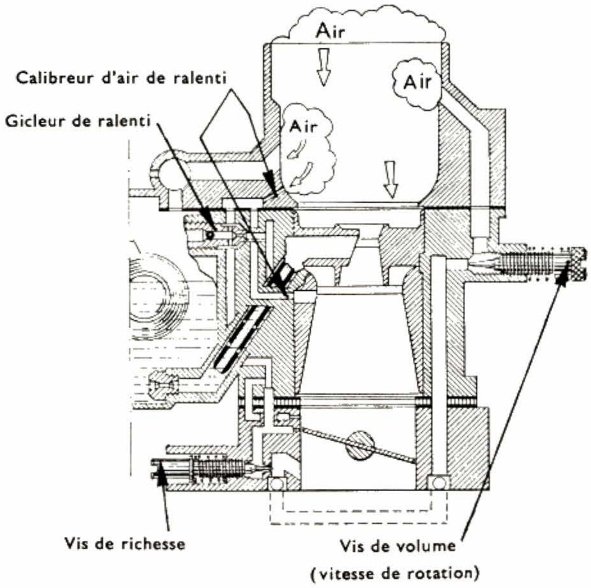


Fig. X-15 — Ralenti à volume d'air (*Solex*)

par une vis pointeau pour assurer le réglage de la vitesse de rotation (fig. X-15). Les by-pass pourront ainsi être usinés par rapport au papillon lui-même après son ajustement dans le corps du carburateur. Quant à l'essence de ralenti, elle sera débitée dans la canalisation d'air complémentaire, ce qui assurera une grande stabilité au dosage du mélange ainsi réalisé.

Les tolérances résultant des possibilités d'une fabrication de série perdront leurs inconvénients dans la réalisation d'une progression de richesse limitée mais sans défaut pour chaque moteur, si le circuit des by-pass comporte lui aussi une vis de réglage. De plus, certains pays ont demandé que les interventions d'entretien ne puissent pas aboutir à des réglages trop riches. Le carburateur comporte alors une vis de limitation agissant en série sur la vis de réglage normale et inaccessible une fois le carburateur monté.

6.1.2. Amorçage. — Le régime pour lequel se produit l'amorçage du circuit principal est, pour un moteur déterminé, essentiellement fonction de la facilité avec laquelle l'essence s'écoule dans la canalisation aboutissant à la sortie dans le diffuseur et de la distance qui la sépare, au repos, de ladite sortie. Le niveau constant doit donc se fixer avec une grande précision. De même, les usinages des canalisations et des pièces de réglage qui y sont introduites (tube d'émulsion, par exemple) doivent être exécutés en respectant des tolérances très étroites.

6.2. Accélérations. — Les quantités d'essence fournies par la pompe de reprise sont généralement fixées par les conditions extrêmes de fonctionnement. Elles sont donc surabondantes pour les accélérations modérées de la zone d'utilisation réglementée.

Une étude de la société Éthyl a montré qu'une petite tubulure très réchauffée associée à un petit corps de carburateur donnait de remarquables résultats, tant au ralenti qu'aux accélérations normalisées, un corps et une tubulure de dimension plus importante permettant de réaliser la suite des performances du véhicule. Malheureusement, la complexité de la réalisation en série d'une telle tubulure rend cette solution prohibitive. Il en est resté le principe, dans certains cas, de l'utilisation de carburateurs compound dans lesquels le premier corps seul est utilisé en cycle dépollué.

De toute façon, il faut limiter au minimum l'emploi de la pompe de reprise. Il peut ainsi devenir utile d'en modifier la commande de telle sorte qu'elle n'intervienne qu'après que l'on ait dépassé certaines ouvertures de papillon. L'essence serait alors fournie principalement au cours des « écrasés », ceux-ci n'étant pas nécessaires pour les accélérations du cycle (principe de la pompe à commande par came).

6.3. Décélérations. — En fin d'échappement, il reste dans le cylindre une quantité de gaz brûlés correspondant, en gros, au volume de l'espace mort et restant constante quelle que soit la vitesse de rotation du moteur. La quantité de gaz frais introduite au cours de l'admission suivante constitue avec ces gaz brûlés un mélange dont la combustion devient impossible si la teneur en gaz brûlés dépasse 35 à 40 % du total.

En décélération, la quantité d'air admise par cycle est d'autant plus faible que la vitesse de rotation du moteur est plus grande alors que le volume des gaz brûlés est resté celui de l'espace mort. La combustion devient très irrégulière et la teneur en hydrocarbures imbrûlés augmente exagérément.

Pour la réduire il peut donc être envisagé :

— de couper le gicleur de ralenti au moyen d'un étouffoir électromagnétique de façon à cesser d'envoyer de l'essence au moteur pendant la plus grande partie de la décélération, la fourniture n'en étant rétablie qu'au moment où l'on revient au ralenti proprement dit. Un relais électronique transmet à l'étouffoir le courant de manœuvre selon la vitesse de rotation du moteur au moment de la fermeture du papillon. Il est cependant difficile d'obtenir de l'étouffoir une étanchéité satisfaisante, le moteur transmettant au carburateur des vibrations importantes dans certaines décélérations ;

— de conserver, tant que la décélération n'est pas suffisamment faible, une ouverture de papillon supérieure à celle du ralenti normal de façon à augmenter la quantité de mélange admise et, par conséquent, de diminuer le pourcentage du gaz brûlé par rapport au gaz frais. Un *dash-pot* agit pour cela sur le levier d'accélération en tenant compte de la dépression enregistrée en aval du papillon des gaz.

7. ALIMENTATION DU CARBURATEUR

On entend par là l'ensemble des dispositifs et tuyauteries qui conduisent le carburant depuis le réservoir jusqu'au carburateur.

7.1. Réservoir. — Le réservoir d'essence est un récipient réalisé en tôle plombée, ou galvanisée, ou, plus rarement, en cuivre rouge. Sa contenance doit être suffisante pour permettre un parcours minimal sans recharge voisin de 400 km. De façon à éviter le balancement de cette quantité importante de liquide, des cloisons intérieures le divisent en compartiments communiquant par leurs parties inférieures.

Son emplacement est variable. Autrefois, on le mettait au-dessus du moteur, derrière la planche de bord, ou encore, dans les camions, sous le siège du conducteur.

Aujourd'hui, le réservoir des voitures particulières est placé à l'arrière lorsque le moteur est à l'avant et inversement. Sur les camions et autocars, il est généralement placé latéralement, le long du cadre.

Du fait de ces divers emplacements, sa forme est généralement très variable et souvent irrégulière de façon à le loger en évitant d'autres organes. L'essence est prise au point le plus bas, dans une sorte de puits aménagé de telle façon que les grosses impuretés ne puissent s'engager dans la tuyauterie de départ.

Sur l'un des côtés du réservoir il y a un orifice de remplissage, parfois suivi d'un long col (voitures particulières), fermé par un bouchon. Un système de jauge à distance permet au conducteur de contrôler à chaque instant l'état de remplissage du réservoir.

7.2. Alimentation en charge. — Le réservoir est placé de telle façon que son point le plus bas soit au-dessus de l'arrivée d'essence du carburateur. L'essence s'écoule donc naturellement par gravité et la canalisation est munie d'un robinet qui doit être fermé à chaque arrêt prolongé du moteur, de façon à éviter une fuite même minime au pointeau de la cuve à niveau constant. À la partie supérieure du réservoir se trouve le bouchon de remplissage. Il est toujours muni d'une mise à l'air libre de façon à permettre un écoulement normal de l'essence. Ce système, qui a l'avantage de la simplicité, présente l'inconvénient

d'être dangereux, le réservoir restant à proximité des sources de chaleur ou d'électricité qui se trouvent dans le compartiment moteur. Il n'est plus utilisé que sur certains modèles de moteurs industriels.

7.3. Alimentation par pompe. — Le réservoir est généralement placé à l'arrière du véhicule et au-dessous du niveau du carburateur. Il faut donc un dispositif spécial pour en extraire l'essence et la hisser jusqu'au carburateur. Dans la quasi-totalité des cas on utilise une pompe qui peut être à commande mécanique ou électrique.

7.3.1. Pompe à commande mécanique (fig. X-16). — Le corps de pompe contient une membrane souple mobile. Cette membrane est actionnée mécaniquement par une tige elle-même commandée par un levier articulé et un excentrique porté par l'arbre à cames du moteur. Le ressort (*R*) maintient la membrane en position haute.

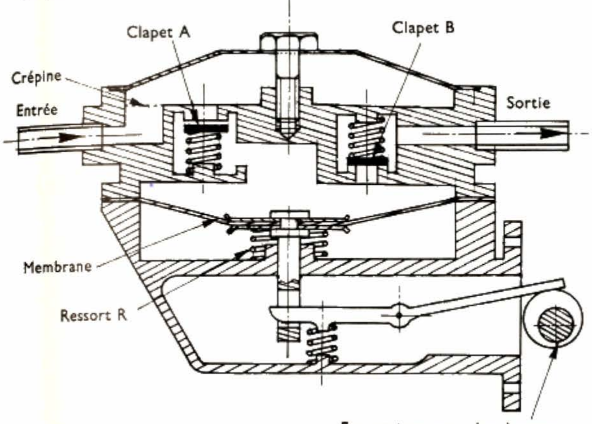


Fig. X-16 — Pompe à commande mécanique

Deux canalisations arrivent au corps de pompe, l'une pour l'arrivée d'essence, l'autre pour le départ vers le carburateur. Un jeu de clapets (*A*) et (*B*) assure soit l'ouverture, soit la fermeture des canalisations. Sur certains modèles, un levier à commande manuelle permet l'amorçage.

Lorsque le moteur tourne, la membrane est soumise à un mouvement de va-et-vient. Chaque fois qu'elle descend, il se produit une dépression à l'intérieur du corps. Le clapet (*B*) se trouve bloqué sur son siège sous l'influence conjuguée de son ressort et de la dépression. En même temps, le clapet (*A*) s'ouvre grâce à la dépression et l'essence se trouve aspirée. Lorsque la membrane remonte, la compression bloque le clapet *A* et ouvre le clapet *B*. L'essence est chassée vers le carburateur.

Si la cuve du carburateur est pleine, le pointeau ferme l'arrivée d'essence. L'essence ne s'écoulant plus s'oppose à la remontée de la membrane. Le levier joue librement dans la fenêtre de la tige.

7.3.2. Pompe électromagnétique. — C'est une pompe qui doit être alimentée par la batterie. Elle est placée sur la tuyauterie d'admission entre le réservoir et le carburateur. Le piston peut être un piston plongeur coulissant dans un cylindre ou un piston déformable en forme de soufflet (fig. X-17). La contraction commandée par une tige attirée par un électroaimant, assure l'aspiration.

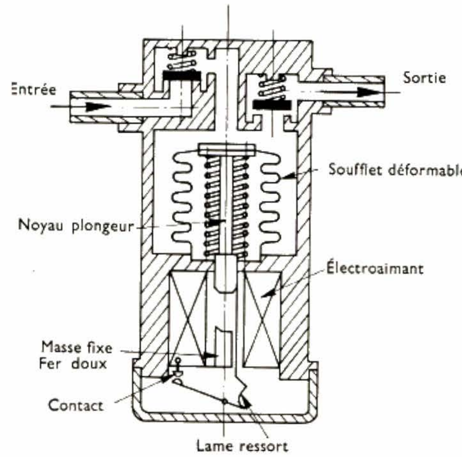


Fig. X-17 — Pompe électrique à soufflet

Les contacts sont établis de façon que l'action magnétique reste efficace pendant toute la période d'aspiration. À la fin de cette période, le courant est coupé et le ressort contenu dans le soufflet le détend et assure le refoulement. Puis le cycle recommence. Un dispositif, variable avec le type d'appareil, arrête le mouvement de la pompe si la cuve du carburateur est pleine et le mouvement reprend quand le pointeau s'ouvre.

La pompe électromagnétique a l'avantage de pouvoir être fixée en un point quelconque sur le parcours de la tuyauterie. Elle peut être ainsi placée loin des sources de chaleur ce qui évite des risques de percolation.

7.4. Filtres d'essence. — Pour éviter que des impuretés contenues dans l'essence ou introduites accidentellement dans le réservoir ne soient à l'origine de pannes (obstruction des conduits d'essence et des gicleurs du carburateur), on place des filtres sur le circuit d'alimentation. Ils sont généralement constitués par une toile métallique, placés au niveau du réservoir, à l'entrée de la pompe et à l'entrée du carburateur et incorporés à ces différents organes.

8. FILTRE À AIR

L'entrée d'air d'un carburateur est munie d'un filtre à air qui a pour but d'arrêter les poussières ; dans l'admission elles pourraient provoquer une usure anormale des différentes parties du moteur en mouvement (segments, chemises, pistons, paliers). Les épurateurs d'air peuvent être de véritables filtres (toile, feutre, etc.) ou des épurateurs statiques comportant soit des chicanes huilées soit des cloisons communiquant à l'air aspiré un mouvement tourbillonnaire, l'inertie centrifuge entraînant la précipitation de la poussière sur les parois.

Le filtre à air a d'autant plus d'importance que dans la recherche des performances des moteurs il est toujours tenu compte des pertes de charge que sa présence entraîne à l'admission. Il est donc particulièrement utile d'en surveiller l'état de colmatage et d'en nettoyer la partie filtrante régulièrement. Certains modèles comportent à ce niveau une cartouche interchangeable, le matériau employé ne supportant pas un dépoussiérage efficace.

CHAPITRE XI

L'INJECTION

1. GÉNÉRALITÉS

Le développement de l'injection est directement lié à celui des moteurs Diesel ou à essence. Les équipements d'injection sont conçus en fonction des exigences des moteurs et réciproquement ; le moteur doit souvent être adapté, sur le plan technologique, à l'utilisation de tel ou tel type de pompe à injection ou d'injecteur. Cette interdépendance ne doit jamais être perdue de vue car c'est en définitive de la bonne collaboration du motoriste et du spécialiste des problèmes de l'injection que dépend la réussite technique et commerciale d'un moteur.

On peut diviser l'injection en deux grandes familles :

— *l'injection Diesel* qui est toujours réalisée à haute pression (100 à 300 bars selon les types de chambre de combustion) ;

— *l'injection d'essence* qui peut se faire, soit à haute pression pour l'injection directe (dans la chambre de combustion), soit à basse pression pour l'injection indirecte (dans la tubulure d'admission).

Les moteurs polycarburants sont particuliers ; ils utilisent indifféremment des combustibles lourds ou légers. Leur cycle de fonctionnement se rapproche du cycle Diesel.

Par ailleurs, les dispositifs d'injection peuvent être subdivisés en pompe en ligne, pompe distributrice ou « rotative », et dispositif d'injection à commande électronique.

La première partie, purement technologique, traitera plus particulièrement le cas des équipements pour moteur Diesel.

2. EXIGENCES DU MOTEUR VIS-À-VIS DE L'ÉQUIPEMENT D'INJECTION

Toute la technologie de l'injection est conditionnée par les exigences suivantes :

— une haute pression d'injection pour l'introduction et la pulvérisation du combustible ;

— une régulation du débit du combustible, pour obtenir un ralenti stable, une courbe du couple adaptée en fonction de la vitesse et une coupure à vitesse maximale ;

— un point d'injection variable pour faciliter le démarrage, réduire le bruit et assurer une bonne performance à vitesse maximale.

3. DÉTAIL D'UN CIRCUIT D'INJECTION (fig. XI-1)

Une pompe d'alimentation, solidaire de la pompe d'injection, aspire le combustible du réservoir au travers d'un préfiltre décanteur et le refoule vers le filtre principal. Le

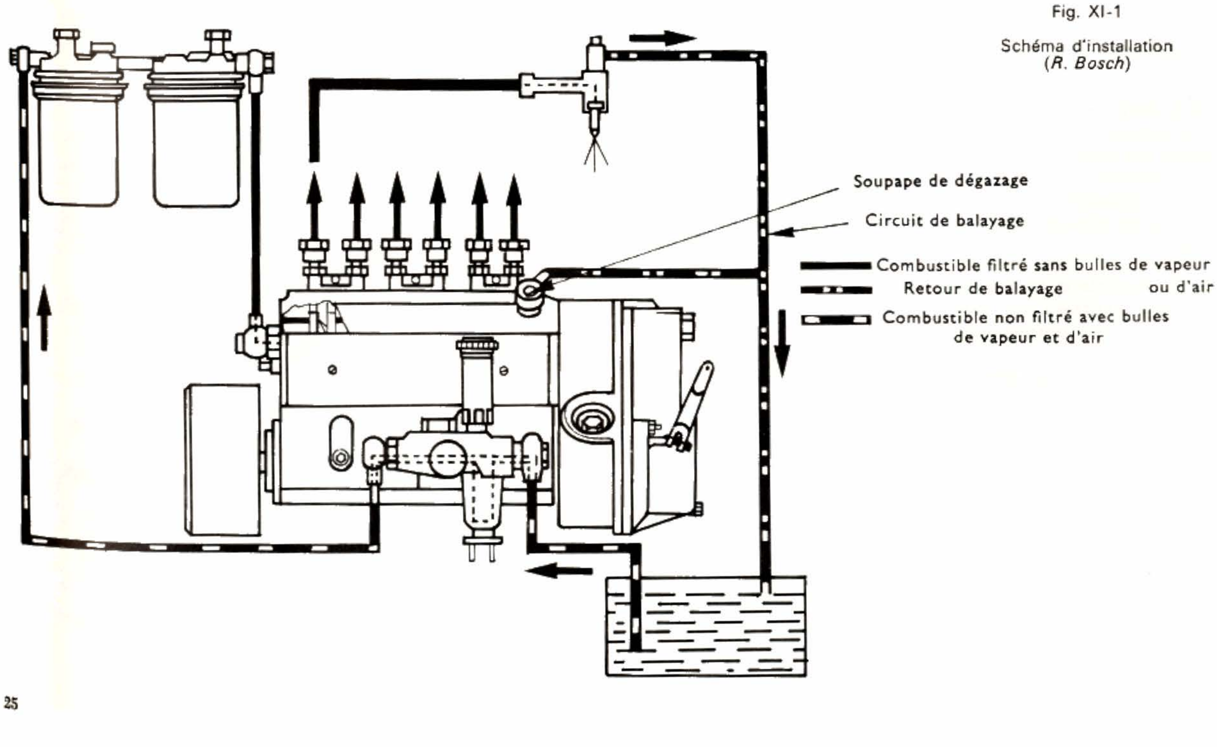


Fig. XI-1

Schéma d'installation (*R. Bosch*)

combustible filtré est envoyé sous pression dans la chambre d'aspiration de la pompe d'injection, d'où les éléments « pistons-cylindre » le refoulent, sous haute pression, vers les injecteurs. Des soupapes de balayage (ou de dégazage), placées sur le filtre et la chambre d'aspiration de la pompe à injection, facilitent l'évacuation des bulles d'air ou de vapeur et assurent, par ailleurs, le refroidissement de la pompe, par le débit de combustible ainsi produit. Les fuites de combustible sont récupérées au niveau des injecteurs et renvoyées au réservoir, en même temps que les divers débits de dégazage.

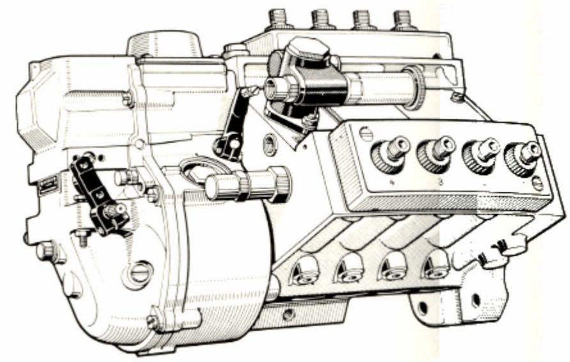


Fig. XI-2 a — Pompe taille « P », 8 cylindres en V avec régulateur (*R. Bosch*)

4. TECHNOLOGIE DES POMPES EN LIGNE (fig. XI-2 a et XI-2 b)

Nous pouvons étudier les divers organes de la pompe, en commençant tout naturellement par le côté entraînement; nous mentionnerons au passage les éléments théoriques nécessaires à la compréhension générale.

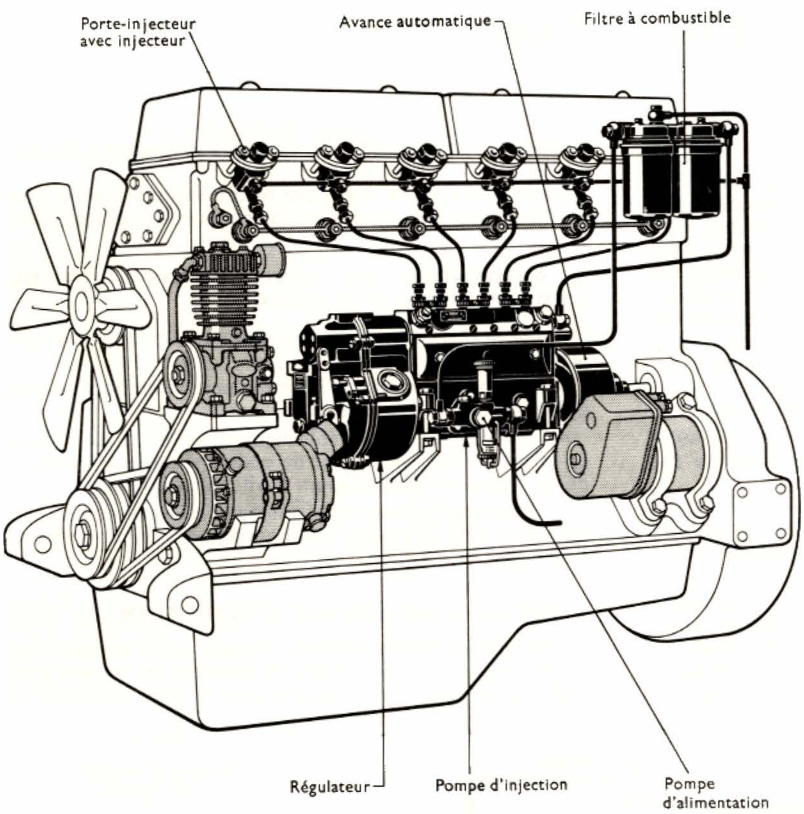


Fig. XI-2 b

Équipement injection d'un moteur Diesel (*R. Bosch*)

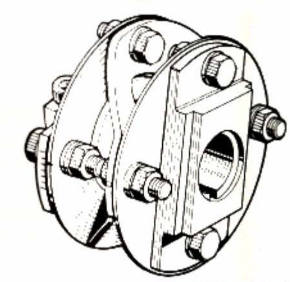


Fig. XI-3 a — Accouplement à lames métalliques (*R. Bosch*)

4.1. Accouplements.

4.1. Accouplements. — Ils doivent assurer deux fonctions distinctes, la transmission du couple et le calage de la pompe par rapport au moteur (fig. XI-3 a et b).

On distingue : le modèle simple réglable, le modèle avec disque croisillon en celoron, l'accouplement Simm's à lamelles de caoutchouc et l'accouplement à lames métalliques.

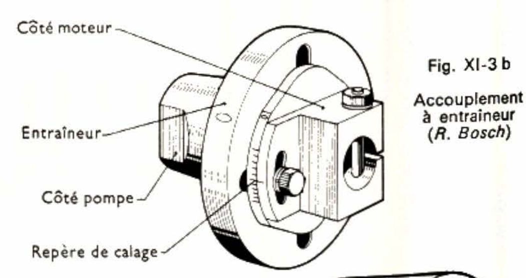


Fig. XI-3 b

Accouplement à entraîneur (*R. Bosch*)

4.2. Avances automatiques (ou manuelles dans des cas isolés). — Elles peuvent être extérieures au moteur ou incorporées dans la distribution de celui-ci (fig. XI-4).

Elles se caractérisent par leur développement total (variation angulaire maximale entre arbres menant et mené) et leurs fréquences de rotation de début et de fin de développement.

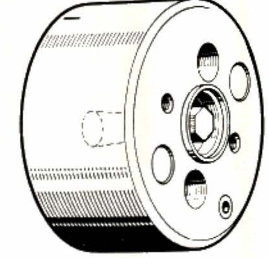


Fig. XI-4

Avance automatique (*R. Bosch*)

4.3. Montage sur moteur. — Le montage de la pompe sur le moteur doit garantir à la fois l'alignement, le centrage, le positionnement et il doit permettre, éventuellement, le calage par rotation de la pompe.

Selon les tailles de pompes et selon leur conception, on distingue les montages en berceau, à plat, à flasque bride et à flasque bride avec point d'appui.

4.4. Cas particulier des pompes sans arbre à cames propre (fig. XI-5 a et b). — Certaines pompes monocylindres ou multicylindres sont entraînées directement par l'arbre à cames du moteur; dans ce cas, cet arbre comporte alors souvent des cames supplémentaires.

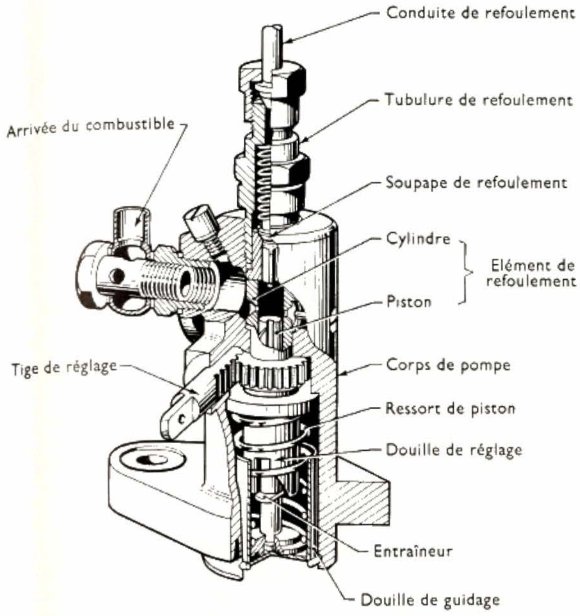


Fig. XI-5 a — Coupe d'une pompe d'injection « PF » (*R. Bosch*)

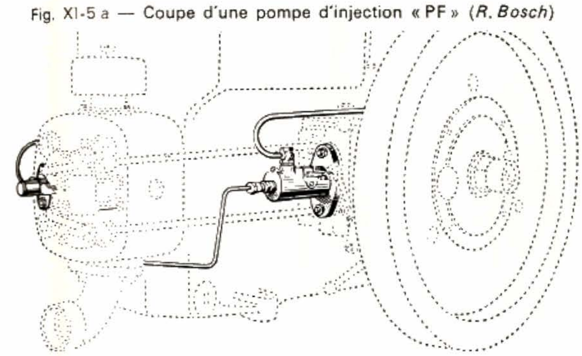


Fig. XI-5 b — Exemple de montage d'une pompe (*R. Bosch*)

Ces pompes sont utilisées soit sur les petits moteurs industriels pour des raisons de prix de revient, soit sur de très gros moteurs d'engins de chantier ou de bateaux, pour des raisons de facilité de maintenance.

4.5. Arbres à cames et formes des cames. — Montés sur roulements ou paliers lisses, les arbres à cames sont fabriqués en acier spécial à haute résistance. Ils comportent autant de cames que la pompe possède de cylindres et, souvent, ils sont équipés d'un excentrique pour l'entraînement de la pompe d'alimentation (fig. XI-6).

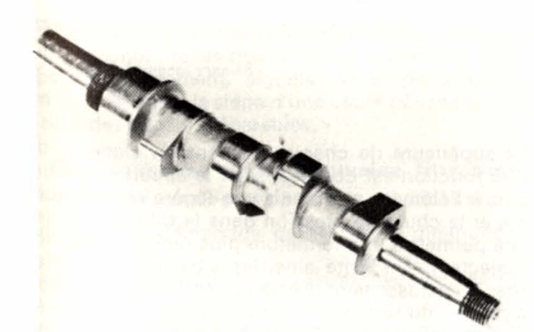


Fig. XI-6 — Arbre à cames pour pompe à 4 cylindres (*R. Bosch*)

La forme des cames conditionne la vitesse de l'injection et donc la qualité de la combustion. On distingue divers profils symétriques à « flancs tangents », bombés côté attaque pour injection plus lente, bombés côté retombée pour supprimer tout risque de démarrage du moteur en sens inverse. (fig. XI-7).

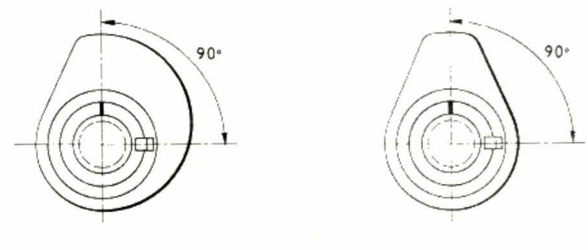


Fig. XI-7 — Formes de cames

Les arbres à cames, ainsi que les poussoirs et les galets, sont des pièces très sollicitées réalisées en aciers spéciaux.

4.6. Poussoirs à galet. — Ils assurent la transmission de la poussée de la came au pied du piston (fig. XI-8). Un réglage par écrou et contre-écrou permet de positionner le piston par rapport au point de début d'injection (pré-course). Un ressort de rappel avec cuvettes maintient le galet au contact de la came, et assure le retour du piston.

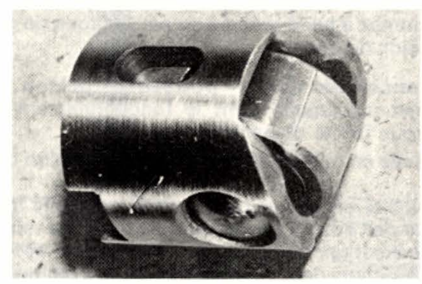


Fig. XI-8 — Poussoir à galet

4.7. Éléments piston-cylindre (fig. XI-9 et XI-10). — Le piston joue le rôle d'un distributeur et assure successivement, grâce à ses rampes et aux orifices percés dans le cylindre, l'admission, l'injection et la fin d'injection.

En outre, la rotation du piston autour de son axe permet la variation du débit et le débit nul en position « stop » ainsi que la variation de l'avance à l'injection en fonction du débit, donc de la charge. La rotation des pistons est commandée par une crémaillère engrenant sur des douilles crantées solidaires du pied de piston.

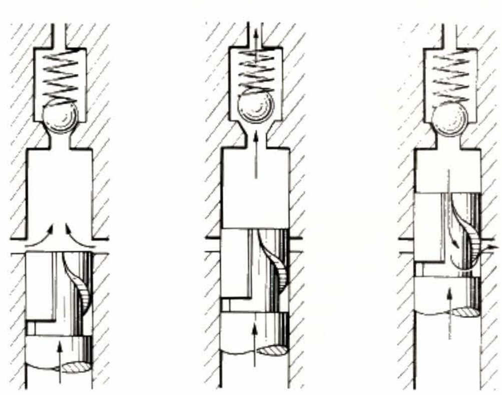


Fig. XI-9 (*R.T.A.*)

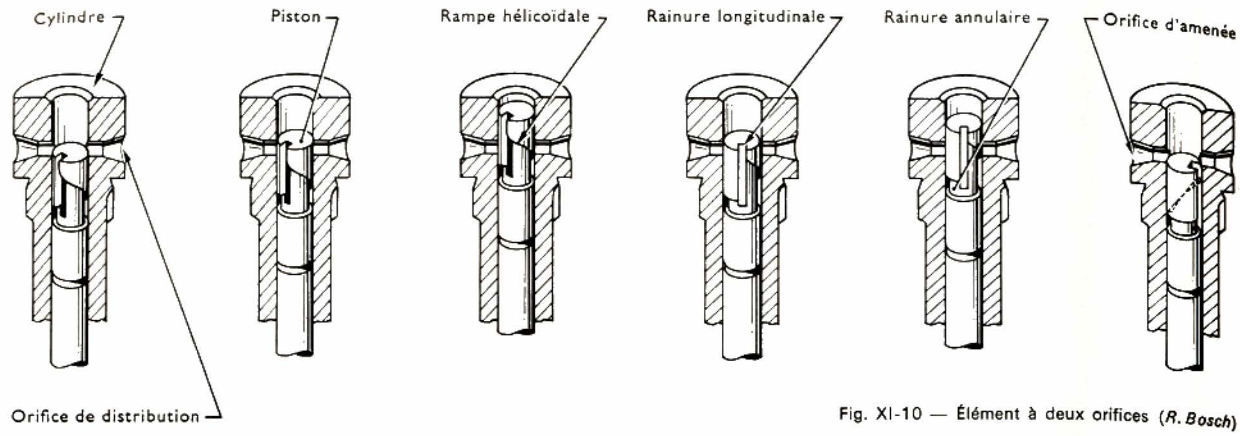


Fig. XI-10 — Élément à deux orifices (*R. Bosch*)

Les éléments piston-cylindre sont des pièces de haute précision (le volume de combustible injecté par cycle représente environ 0,02 % de la cylindrée) ; d'un très grand fini de surface, ils sont appariés au micromètre près. Les jeux sont de l'ordre de 3 à 7 micromètres. Ces faibles tolérances justifient pleinement les précautions prises lors de la filtration.

Malgré le faible jeu fonctionnel, il y a tout de même quelques fuites ; pour cette raison des gorges de récupération sont souvent usinées sur le piston. Cependant, des fuites sont nécessaires pour assurer la lubrification de l'élément.

Certains éléments spéciaux, prévus pour l'injection d'essence ou le fonctionnement polycarburant, comportent des rainures de graissage recevant l'huile sous pression refoulée par une pompe à huile séparée ou par le circuit de graissage sous pression du moteur.

4.8. L'ensemble came - poussoir - piston. — C'est un système mécanique dont le fonctionnement peut se traduire sous forme d'abaques, exprimant :

— la levée en millimètres par degré de rotation de l'arbre à cames,

— la vitesse en mètres par seconde pour une fréquence de rotation de l'arbre à cames de mille tours par minute,

— l'accélération du piston en mètres par seconde au carré en fonction de la rotation de l'arbre à cames dans les mêmes conditions (fig. XI-11).

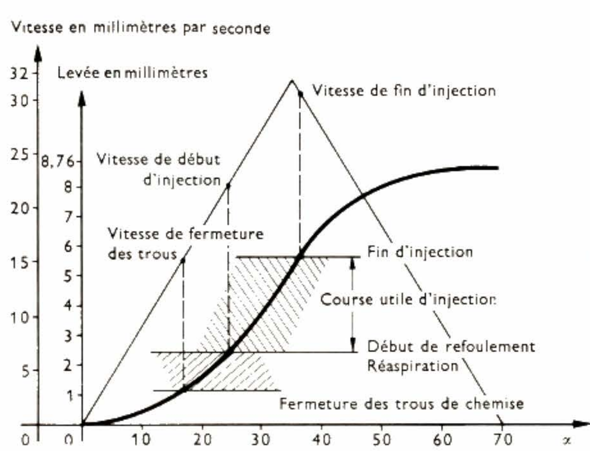


Fig. XI-11

Diagramme de levée et de vitesse d'une came

On distingue le cas théorique et le cas réel car la nécessité de prévoir des profils de raccordements entraîne un léger arrondissement des abaques.

Connaissant le diamètre du piston, ces abaques permettent de passer facilement au volume injecté par unité d'angle de rotation de l'arbre à cames, au débit total et au gradient de débit.

Réciproquement, une chambre de combustion déterminée nécessite un gradient de débit optimal. La connaissance de cette valeur et de la vitesse de rotation de la pompe permet de déterminer le diamètre de piston nécessaire, en liaison avec un profil de came donné. Une bonne turbulence de l'air dans la chambre de combustion permet de prolonger le temps d'injection, donc de réduire le diamètre du piston ou d'utiliser une forme de came plus progressive, diminuant par là les contraintes mécaniques.

Par ailleurs, les abaques de prédétermination donnés par les constructeurs de pompe d'injection sont très utiles pour choisir (en fonction du débit souhaité par coup de piston) le diamètre du piston, compte tenu des impératifs dus au régulateur, et la durée que l'on peut accorder à l'injection (exprimée en degrés de rotation de l'arbre à cames).

4.9. Clapets et soupapes à réaspiration (fig. XI-12). À la fin de la phase d'injection commandée par le piston, la pression décroît dans le circuit d'injection. Pour éviter que cette pression ne devienne trop faible, on dispose à la

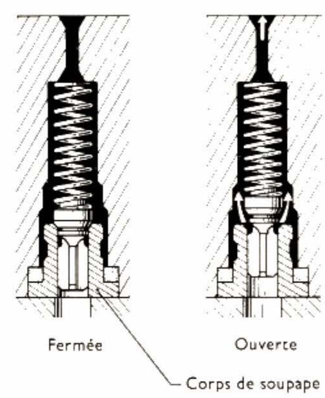
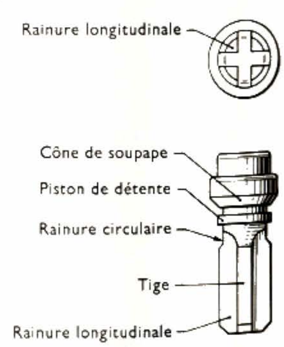


Fig. XI-12

Soupape à réaspiration



partie supérieure de chaque élément un clapet antiretour dont la fonction est double : isoler le circuit d'injection par rapport à l'élément et obtenir une légère réaspiration pour accélérer la chute de pression dans la tubulure d'injection, afin de permettre une fermeture plus rapide et plus franche de l'injecteur. On évite ainsi les « bavures » à l'injecteur, sources d'encrassement prématuré et de formation de coke.

La plupart du temps, un clapet à réaspiration se présente sous forme d'un clapet habituel à siège conique, complété d'une collerette faisant office de piston de réaspiration.

De plus, les clapets sont souvent utilisés pour modifier l'allure de la loi du débit en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Cet effet peut encore être accentué par l'utilisation de clapets à réaspiration variable, croissant avec la vitesse de rotation.

4.10. Graissage. — En règle générale, la partie haute de la pompe est lubrifiée par le gasoil et la partie basse par de l'huile contenue dans le carter de la pompe. Il est nécessaire d'utiliser une bonne huile moteur et de vérifier périodiquement le niveau.

Les pompes pour moteur polycarburant nécessitent un circuit de graissage spécial pour les éléments ainsi que pour la pompe d'alimentation. À cet effet, un embranchement est souvent prévu sur le circuit d'huile sous pression du moteur. Il est inutile de préciser que la filtration doit être particulièrement soignée.

4.11. Prédétermination d'une pompe à injection. — La technologie du moteur nous donne les premières indications quant au nombre de cylindres, au type de pompe (en ligne, distributrice, ou sans arbre à cames) et au type de montage (en berceau, à plat, ou par flasque bride).

Les performances demandées au moteur : puissance par cylindre, cycle, vitesse de rotation, consommation spécifique, permettent de préciser le débit par coup donc la dimension de la pompe.

Le type de chambre de combustion retenu donne un premier renseignement sur la vitesse d'injection requise donc sur le diamètre du piston d'injection ainsi que sur la forme de came à retenir pour les premiers essais.

Partant des données du diamètre de l'élément d'injection et de la vitesse de rotation, les abaques fournis par les constructeurs de pompe permettent de déterminer la puissance absorbée donc de définir les transmissions et accouplements, compte tenu des pointes de couple cycliques dues au fonctionnement de la pompe.

La valeur du volume réaspiré par les clapets de réaspiration est déterminée à la fois par l'expérience et par des essais systématiques ; ceux-ci permettent d'obtenir, d'une part, une courbe de débit injecté aussi régulière que possible en fonction de la vitesse de rotation du moteur, d'autre part, une courbe de couple se rapprochant le plus possible de la courbe idéale pour les qualités routières du véhicule.

À cet effet, très souvent on fait varier aussi la longueur et le diamètre des tubulures d'injection.

Le point d'injection correspondant au calage initial ainsi que le développement de l'avance sont déterminés expérimentalement, selon les exigences de l'utilisateur : bruit, fumée, puissance, etc. À ce stade, on peut en arriver à retoucher la forme des éléments : nombre d'orifices de remplissage, forme de la rampe supérieure du piston, celle-ci conditionnant, par ailleurs, par le débit de surcharge qu'elle peut donner, la facilité de départ à froid, et, par le retard à l'injection en position débit minimal, la douceur de fonctionnement au ralenti.

5. TECHNOLOGIE DES FILTRES À COMBUSTIBLE, LEURS EXIGENCES

5.1. Nécessité de filtrer le gasoil. — Le filtrage du combustible est une condition essentielle du bon fonctionnement d'un moteur Diesel. En effet, si l'on utilise un combustible mal filtré, les pièces de précision de l'équipement d'injection, telles que piston et cylindre de pompe, soupape de refoulement, aiguilles et corps d'injecteurs, sont en peu de temps le siège d'une usure très prononcée et il en résulte des dégâts irréparables.

5.2. Conséquences d'une mauvaise filtration. — *L'usure des pistons de pompe et des soupapes* entraîne :

— un mauvais démarrage causé par la diminution du débit ;

— une marche irrégulière au ralenti, avec calage éventuel ;

— une perte de puissance du moteur, sensible surtout aux basses vitesses.

L'usure des injecteurs entraîne :

— un mauvais démarrage causé par une pulvérisation incorrecte ;

— une combustion défectueuse, avec production abondante de fumées d'échappement ;

— un manque de souplesse ;

— une consommation excessive de carburant ;

— un manque de puissance.

Pour faire apparaître ces divers incidents il suffit souvent de rouler durant quelques centaines de kilomètres sans filtre. Le phénomène est irréversible, la pompe d'injection et les injecteurs peuvent être rendus totalement inutilisables.

5.3. Cartouches filtrantes à combustible (fig. XI-13 a, b, c, d et e). — L'évolution de la technique a mis le papier au premier rang des matériaux filtrants.

Il possède, en effet, des propriétés particulièrement intéressantes dans ce domaine. Lors de la fabrication, il permet de respecter les cotes déterminantes pour la qualité du filtre, telles que grosseur et répartition des pores. En outre il est utilisable pour la réalisation de filtres offrant une grande surface efficace et, de ce fait, possédant une longue durée de service.



Fig. XI-13 a

Bloc filtrant à combustible

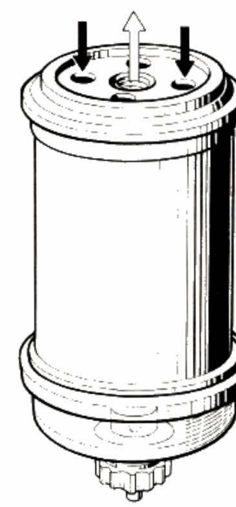


Fig. XI-13 b

Bloc filtrant avec collecteur d'eau transparent

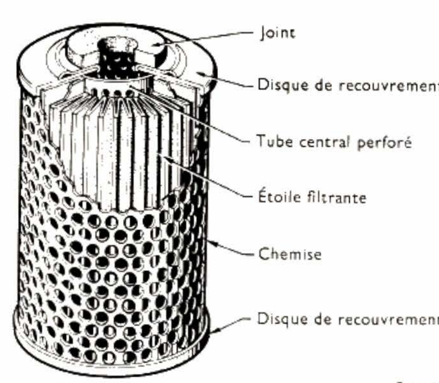


Fig. XI-13 c

Cartouche filtrante étoile

Une tendance, qui se généralise actuellement, est celle du bloc filtrant, boîtier métallique avec cartouche filtrante se vissant en place. L'ensemble se jette après usage, telle une cartouche de filtre à huile de moteur à essence. Bien qu'un peu plus coûteux, le bloc filtrant présente des avantages intéressants qui le font préférer aux solutions conventionnelles : remplacement rapide et propre, assurance d'un fonctionnement avec filtre car son oubli empêche la marche du moteur.

Le gasoil contient de l'eau fixée moléculairement (jusqu'à 0,02 %) ainsi que de l'eau non fixée. De ce fait, les filtres à combustible sont associés le plus souvent à des

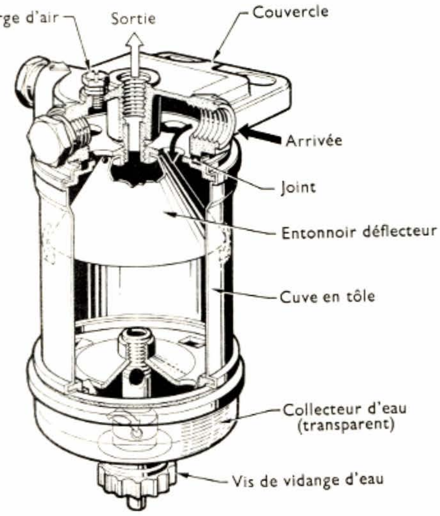


Fig. XI-13 d — Séparateur d'eau (coupe) avec couvercle pour montage horizontal

séparateurs d'eau avec dispositif de purge qui prolongent la durée de vie de la pompe. En effet, ce séparateur, qui peut être distinct ou associé au filtre, permet d'éliminer non seulement les gouttelettes d'eau les plus grosses mais également les particules de rouille, de calamine et de poussière. En outre, lors de basses températures, le séparateur arrête les particules de paraffine qui se forment dans le combustible, évitant ainsi le colmatage du filtre. L'aspect extérieur d'un séparateur d'eau est le même que celui d'un *box-filtre* avec cuve de décantation. Toutefois, au lieu d'une cartouche filtrante, sa cuve renferme un entonnoir déflecteur.

Le principe de fonctionnement d'un séparateur d'eau repose sur le fait que, en s'écoulant sur l'entonnoir déflecteur, le combustible et les gouttelettes d'eau qu'il contient subissent une certaine accélération entre les bords de l'entonnoir et la paroi de la cuve. Du fait de leur masse, les gouttelettes d'eau conservent la vitesse ainsi acquise et vont se rassembler au fond de la cuve.

Pour obtenir une bonne élimination de l'eau, le séparateur d'eau doit être monté en amont de la pompe d'alimentation auxiliaire, le régime pulsatoire en aval de cette dernière favorisant le mélange de l'eau et du combustible. L'efficacité de la filtration est jugée à l'aide de méthodes normalisées. On admet couramment qu'un dispositif de filtration bien adapté doit avoir une efficacité voisine de 98 à 99 %. Le dispositif de filtration est choisi en fonction de la taille du moteur, de la nature du combustible, de l'environnement plus ou moins polluant et aussi du type de pompe d'injection.

6. LES POMPES D'ALIMENTATION (fig. XI-14 a, b et c)

Le combustible doit être amené sous pression (environ 1 bar $= 10^5$ Pa) à la pompe d'injection, sinon le remplissage des éléments serait défectueux. Seuls quelques rares cas particuliers permettent de prévoir un réservoir en charge (moteurs stationnaires et quelques tracteurs agricoles). En conséquence, dans la plupart des moteurs Diesel, il faut que le combustible soit pompé et refoulé vers la pompe d'injection. La pompe d'alimentation est donc nécessaire ; de plus, outre sa fonction propre d'alimentation, elle assure aussi, dans de nombreux cas, le balayage de la pompe d'injection, destiné à éviter son échauffement excessif et à évacuer les bulles de dégazage du combustible prenant naissance sous l'action conjuguée de la température et du brassage mécanique.

La pompe d'alimentation est une pompe à piston simple ou à double effet. Elle est, en général, munie d'une pompe d'amorçage à main et d'un préfiltre décanteur. Elle est montée sur la pompe d'injection et entraînée par l'arbre à cames de cette dernière. La commande est assurée, soit par l'une des cames d'injection, soit par un excentrique disposé entre deux cames d'injection.

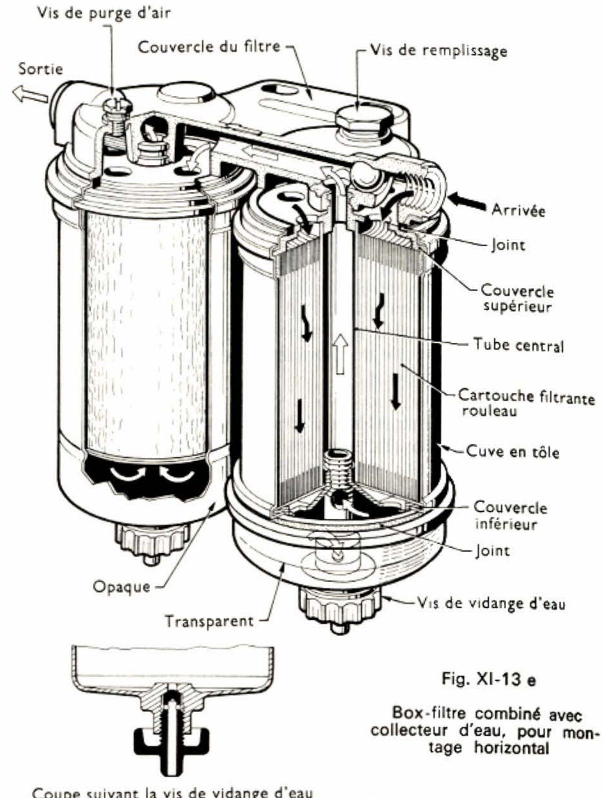


Fig. XI-13 e

Box-filtre combiné avec collecteur d'eau, pour montage horizontal

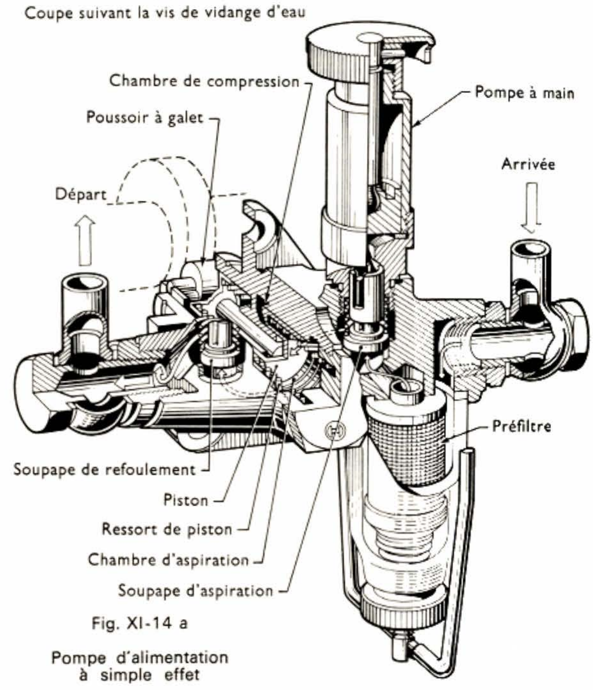


Fig. XI-14 a

Pompe d'alimentation à simple effet

7. LES INJECTEURS (fig. XI-15 a, b et c)

En fait l'injecteur est une soupape tarée de grande précision (jeu de deux à trois micromètres) dont l'orifice de décharge possède une forme particulière, étudiée en vue d'obtenir une pulvérisation optimale du combustible, selon une répartition préétablie dans la chambre de combustion. Les jets peuvent être plus ou moins pénétrants, uniques ou multiples, dirigés directement dans la chambre de combustion (injection directe) ou dans une chambre auxiliaire (chambre de turbulence, préchambre, chambre à réserve d'air).

Lors du démarrage à froid, les chambres auxiliaires sont le plus souvent réchauffées par des bougies de réchauffage

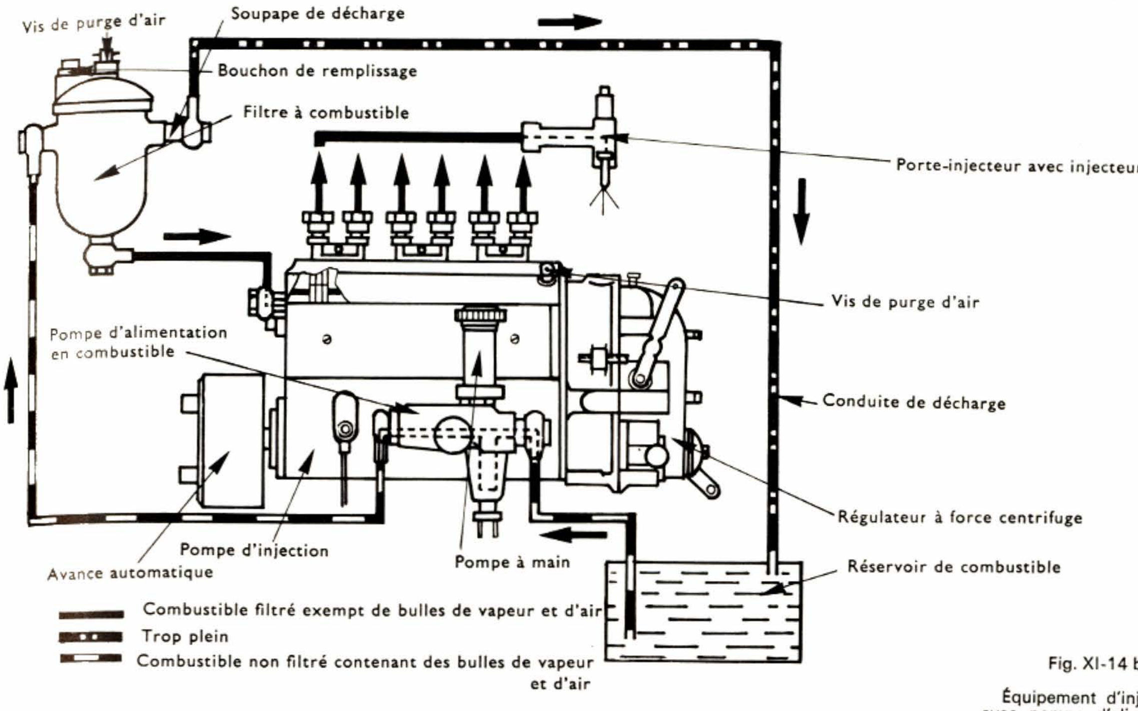


Fig. XI-14 b

Équipement d'injection avec pompe d'alimentation

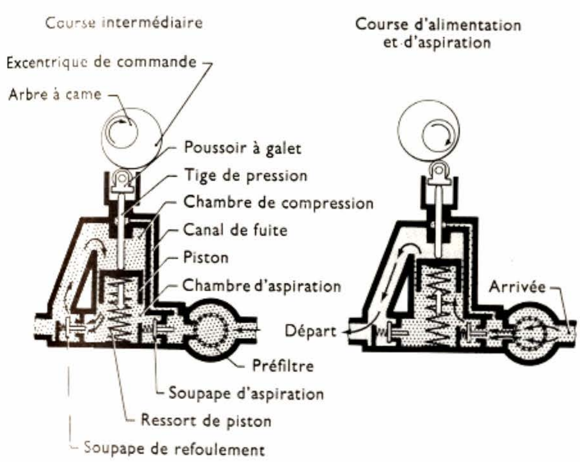


Fig. XI-14 c — Pompe d'alimentation à simple effet

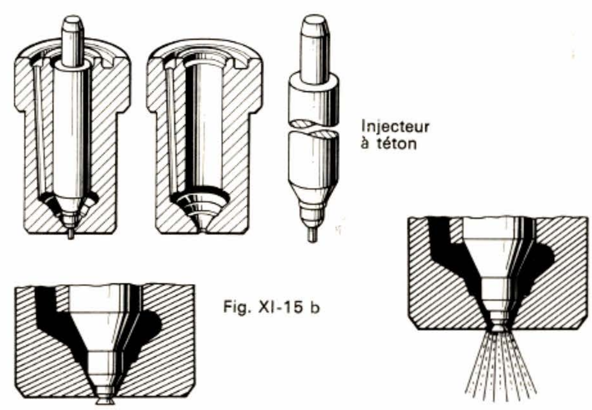


Fig. XI-15 b

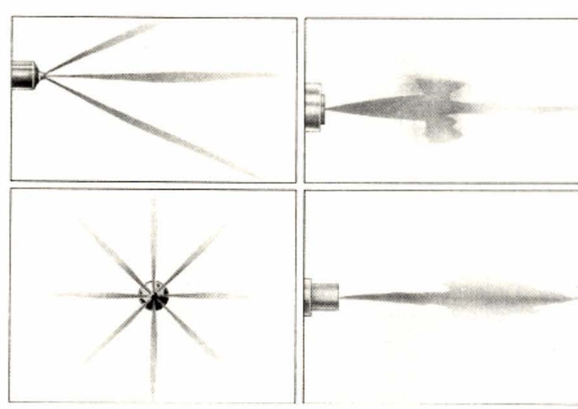


Fig. XI-15 c — Formes de jets

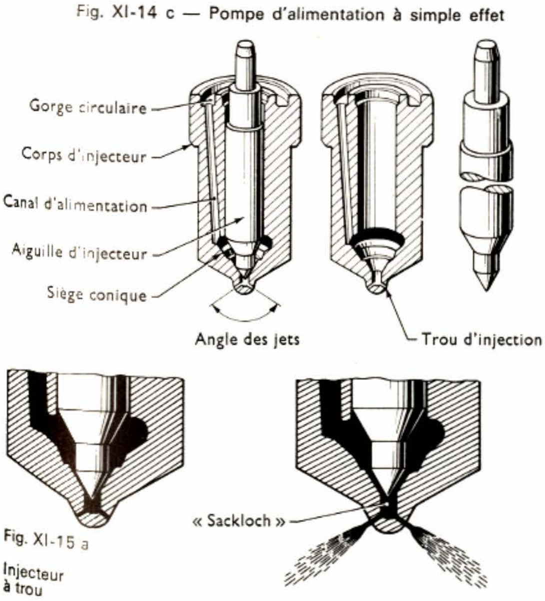


Fig. XI-15 a

Injecteur à trou

(résistances branchées sur la batterie du véhicule et vissées dans la préchambre).

Le choix de l'injecteur est effectué d'après le type de chambre de combustion : injecteur à trou (unique ou multiple) pour les moteurs à injection directe ou chambre de combustion formée dans le piston (système M.A.N.), injecteur à tétons pour les moteurs à chambre Ricardo ou dérivées.

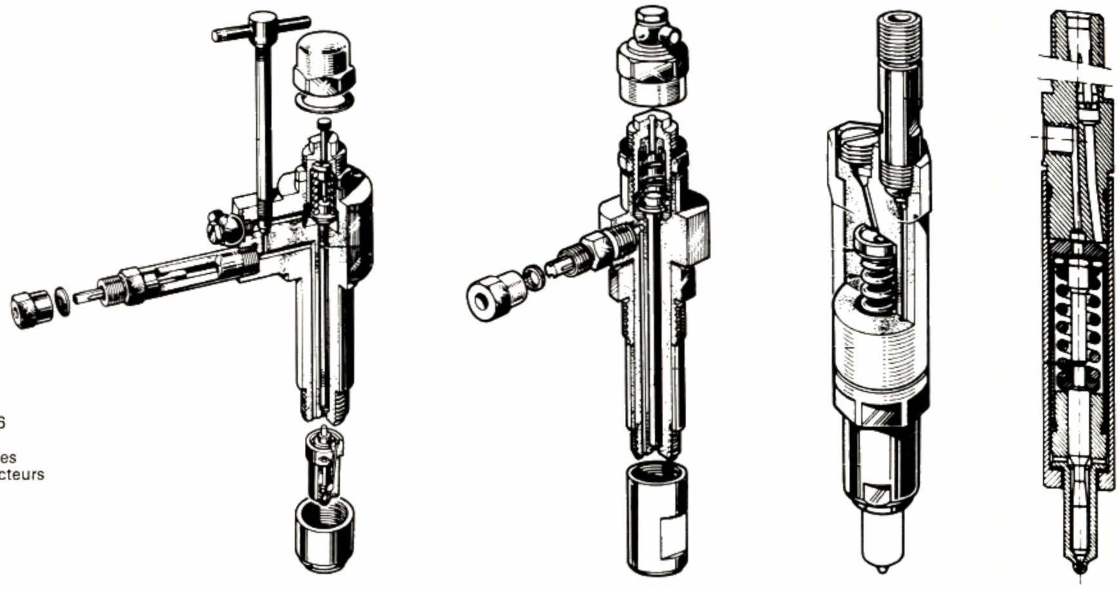


Fig. XI-16

Divers types de porte-injecteurs

L'injecteur est positionné dans la culasse à l'aide d'un porte-injecteur, vissé ou bridé. L'ensemble des cotes d'usinage doit être suffisamment précis pour assurer le positionnement rigoureux du nez de l'injecteur dans la chambre de combustion, en profondeur et en direction le cas échéant. L'injecteur doit être refroidi afin d'éviter la cokéfaction et une déformation éventuelle. Dans les petits moteurs, l'évacuation naturelle de la chaleur vers la culasse est suffisante. Dans les gros moteurs, en revanche, il n'est pas rare de rencontrer une circulation de refroidissement de gasoil ou d'eau dans les injecteurs.

Compte tenu de la précision exigée dans le débit de l'injecteur, les orifices dûment calibrés ne sont pas vérifiés en diamètre mais en débit d'air ou d'huile à une pression de référence.

La prédétermination des injecteurs peut se faire par des formules empiriques et les essais sont seuls juges du choix final :

$$s = \frac{S.v + K_1}{K_2 . 10^4}$$

avec :

s : section de l'orifice en millimètres carrés ;
S : section du piston en centimètres carrés ;
v : vitesse moyenne du piston en centimètres par seconde.

K_1 et K_2 étant deux constantes dont les valeurs sont données dans le tableau suivant :

	Injecteurs à trous	Injecteurs à tétons
K_1	26 800	32 600
K_2	45	30

Par ailleurs, on admet généralement que la vitesse dans les tubes d'injection est proche de 25 à 40 m/s alors qu'au niveau des clapets et des sections aux profils compliqués, elle est réduite à 15 à 20 m/s.

Exemple 1 :
Considérons le moteur Unic à injecteurs à trous, d'alésage 118 mm, de course 150 mm et dont la fréquence de rotation est de 2 000 tr/mn :

$$s = \frac{108 \times \frac{2 \times 15 \times 2\,000}{60} + 26\,800}{45 . 10^4} = 0{,}3 \text{ mm}^2$$

ce qui est obtenu avec trois trous de 0,36 millimètre de diamètre.

Exemple 2 :
Considérons le moteur Berliet à injecteur à tétons, d'alésage 140 mm, de course 160 mm dont la fréquence de rotation est de 1 800 tr/mn. La section de la couronne est égale à :

$$s = \frac{154 \times \frac{2 \times 16 \times 1\,800}{60} + 32\,600}{30 . 10^4} = 0{,}6 \text{ mm}^2$$

Cela a conduit à prendre :

$\varnothing$ trou = 2 mm
$\varnothing$ téton = 1,8 mm } $s = 0{,}6$ mm²

Des nécessaires de nettoyage permettent de réaliser les quelques interventions simples, réalisables sur les injecteurs. Il faut proscrire, toutefois, la rénovation des injecteurs réalisée par remplacement des aiguilles et rodage du siège. Il est à noter qu'en usine l'aiguille est rectifiée à un angle légèrement supérieur à celui du siège ; cela permet d'obtenir une étanchéité parfaite, résultant d'une portée parfaite après déformation des surfaces en contact.

8. LES PORTE-INJECTEURS (fig. XI-16)

Ils sont constitués essentiellement par un corps en acier, comportant plusieurs perçages, auxquels sont reliés, d'une part, la tubulure d'arrivée, et, d'autre part, l'injecteur. Il est prévu une canalisation pour le retour des fuites. Ce corps est alésé suivant son axe pour recevoir la tige-poussoir et le ressort de tarage. Un autre perçage, parallèle à cet axe, assure l'arrivée du combustible à l'injecteur. Les raccords sont disposés, soit latéralement, soit axialement, selon l'emplacement de l'injecteur sur la culasse et selon la place disponible. Dans le raccord d'arrivée est souvent logé un filtre-tige destiné à arrêter les impuretés ayant pu pénétrer dans le tube d'injection, lors d'un démontage, par exemple. Le filtre est apparié avec le raccord et ne doit donc pas être échangé. Sur certains porte-injecteurs est prévue une vis de purge mettant directement en communication l'arrivée à haute pression avec le retour de fuites.

8.1. Tarage du porte-injecteur. — Le ressort du porte-injecteur est taré soit à l'aide d'un dispositif vis-écrou à réglage progressif, soit à l'aide de rondelles de calage calibrées, garantissant une certaine inviolabilité du réglage.

8.2. Montage de l'injecteur dans son porte-injecteur. — Celui-ci doit se faire avec le plus grand soin car les faces de contact rodées ne supportent aucune impureté. Les serrages des écrous sont réalisés au couple imposé par le constructeur.

8.3. Montage de l'ensemble dans la culasse. — Deux types principaux de fixation sont utilisés usuellement : la fixation par bride (porte-injecteur bridé dans la culasse) et la fixation par filetage (porte-injecteur vissé dans la

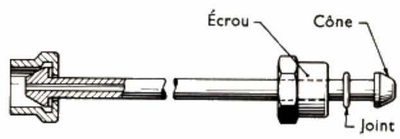
culasse). Dans les deux cas, l'étanchéité est réalisée par un joint de cuivre recuit entre culasse et injecteur. Dans le but de réduire les dimensions de l'ensemble habituel : porte-injecteur et injecteur, on a tenté de combiner l'ensemble en une pièce unique, souvent non démontable : c'est l'injecteur crayon, d'un diamètre de corps pouvant ne pas dépasser 9,5 mm. De ce fait, il se loge dans les culasses les plus petites sans gêner la disposition des chemises à eau nécessaires au refroidissement. De plus, pour des injecteurs à trous multiples, il convient d'assurer un bon positionnement du porte-injecteur dans la culasse, à l'aide d'une butée de calage, l'injecteur étant lui-même positionné dans le corps du porte-injecteur par un téton de centrage.

9. TUBULURES D'INJECTION — RACCORDS — RETOUR DE FUITE (fig. XI-17)

Les tubulures d'injection doivent résister aux contraintes cycliques provoquées par les montées en pression répétées du gasoil lors des injections successives, la pression moyenne étant de 200 bars et la pression maximale de 600 bars et plus. Elles sont donc réalisées en tube d'acier étiré, sans soudure, parfaitement calibré, et munies d'extrémités

Fig. XI-17

Tube d'injection avec joints et écrous de raccord, cône refoulé



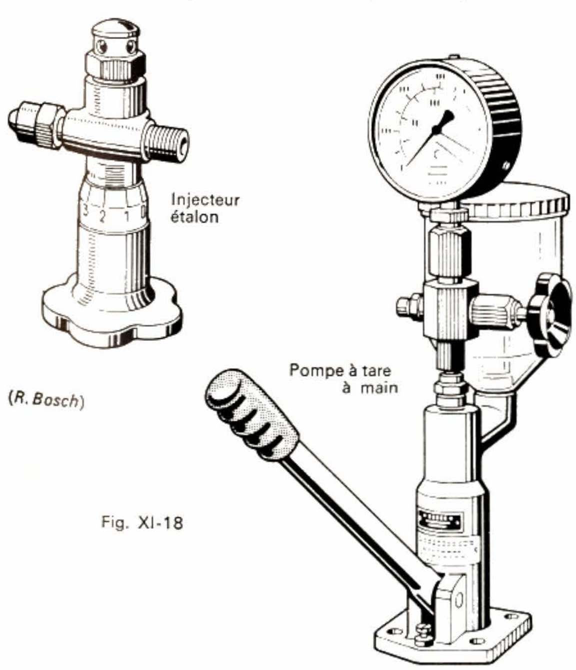
coniques à 45°, refoulées à l'aide d'une presse spéciale Dans certaines applications, les extrémités de raccordement, façonnées sur un tube de diamètre intérieur égal au diamètre extérieur du tube, sont brasées sur des tubulures coupées à la demande. Il existe également des olives de raccordement à 60° qui se sertissent automatiquement sur le tube lors du serrage de l'écrou de raccord. Les tubes de retour de fuite ne subissent qu'une pression négligeable, aussi les réalise-t-on souvent en matériau souple : caoutchouc synthétique, nylon, etc. ou en cuivre avec raccords brasés.

10. VÉRIFICATION DE L'INJECTEUR ET DU PORTE-INJECTEUR (fig. XI-18)

Un contrôle de l'injecteur sur moteur sans démontage, appelé diagnostic, est possible ; il permet de mesurer la pression de tarage (par comparaison avec un injecteur étalon à tarage variable) et de vérifier l'étanchéité. Pour une investigation plus poussée, il faut déposer l'injecteur avec son porte-injecteur et tester l'ensemble à la pompe à tarer (à main ou électrique). Cela permet de contrôler de façon précise :

— l'étanchéité (acceptable si l'écoulement ne dépasse pas deux gouttes par minute),
— le tarage de la pression d'ouverture,
— la forme et la répartition du jet,
— la pulvérisation,
— le « ronflement » dû aux vibrations de l'aiguille sur son siège qui hache ainsi le jet. Le ronflement diffère selon le type d'injecteur, la cadence de manœuvre du levier de la pompe à tarer, la contre-pression éventuelle sur l'injecteur.

On profite de ce démontage pour nettoyer l'injecteur à l'aide des outillages spécialisés fournis par le fabricant. La « rénovation » des injecteurs est à proscrire, du fait des tolérances dimensionnelles et angulaires très limitées de ce matériel.



(*R. Bosch*)

Fig. XI-18

11. LA CARACTÉRISTIQUE DE DÉBIT ET LA LOI D'INJECTION

La loi d'injection, qui est la caractéristique de débit de l'injecteur en fonction du temps, est, en fait, le résultat de la superposition de la loi de débit de l'élément d'injection (ou courbe naturelle de pompe) et des effets additionnels dus aux clapets, raccords, tubulures, injecteurs, etc. La notion de débit est donc à examiner sous deux aspects.

11.1. Caractéristique de débit de la pompe ou courbe naturelle. — Pour un élément déterminé (course et diamètre constants) la courbe naturelle Q (N), Q étant exprimé en millimètres cubes par coup et N en tours par minute, est sensiblement rectiligne et croissante vers les grandes fréquences de rotation, du fait de la diminution de l'importance des fuites et aussi par un phénomène de « pré-injection », dû à la viscosité et à l'inertie du gasoil

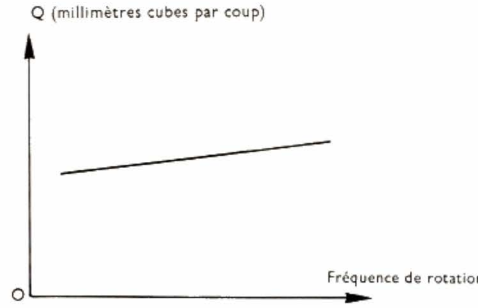


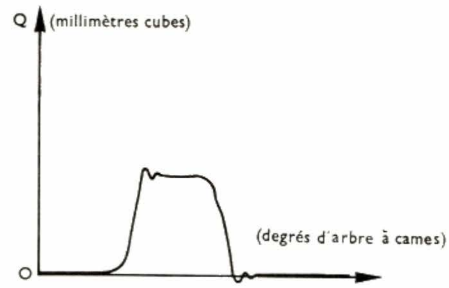
Fig. XI-19

Courbe naturelle de débit d'une pompe à injection

(fig. XI-19). Sur moteur, cette augmentation du débit en fonction de la fréquence de rotation se traduit par une augmentation correspondante du couple. Or un véhicule routier, d'une utilisation agréable, se caractérise par une courbe de couple idéal absolument opposée : il nécessite un couple maximal à faible vitesse et en décroissance vers les grandes vitesses de rotation. L'adaptation de la loi de débit de la pompe à la courbe de couple, souhaitée pour le moteur, sera réalisée en agissant sur divers paramètres du circuit d'injection détaillés ci-après.

11.2. La loi de débit de l'injecteur ou débit instantané. — Un passage de la pompe au banc d'essai permet de déterminer le volume injecté par coup, en faisant la moyenne sur 50 à 1 000 coups ou en faisant une mesure individuelle coup par coup mais ne donne aucune indication quant à la répartition dans le temps de ce volume. Des appareils plus élaborés, pouvant simuler les conditions « moteur » (utilisation de l'injecteur moteur, tarage variable, contre-pression réglable), permettent de définir la loi de débit à partir de la mesure de la pression instantanée dans un dispositif d'écoulement étalon. Elle est généralement exprimée en millimètres cubes par degré de rotation d'arbre à cames (V. fig. XI-20). L'analyse de cette loi d'injection visualisée sur oscilloscope (V. t. 1, Électronique) permet un diagnostic très sûr lors de recherches de défauts de conception et offre, par ailleurs, au chercheur un moyen d'investiga-

Fig. XI-20



Loi de débit d'un injecteur

tion très poussé en ce qui concerne la montée en pression, les oscillations, les rebondissements d'aiguille d'injecteur, les pré-injections et post-injections, etc. Par ailleurs, l'intégration de la loi de débit permet de retrouver le débit injecté par coup.

12. NOTIONS SUR L'INFLUENCE DE DIVERS PARAMÈTRES

L'adaptation d'une pompe d'injection sur un moteur Diesel est le résultat d'une suite d'optimalisations, réalisées en faisant varier soit successivement, soit simultanément, un certain nombre de paramètres dont on connaît généralement l'influence, par la théorie ou l'expérience. Les limites de variation sont imposées tant par la technologie de l'équipement d'injection que par celle du moteur. Par ailleurs, le critère final est toujours la qualité de la combustion, gage d'un fonctionnement sûr et d'une bonne longévité du moteur et de ses accessoires.

12.1. Une bonne adaptation d'équipement d'injection se caractérise par les points suivants :

— courbe naturelle de débit de la pompe modifiée pour répondre à la demande du moteur ;
— fonctionnement souple du moteur à toutes les vitesses de rotation ;
— courbe de couple régulière et couple maximal bien placé en bas régime ;
— bruit minimal ;
— puissance maximale suffisante ;
— faible consommation spécifique ;
— bon démarrage à toutes les températures usuelles ;
— faible encrassement des injecteurs qui est un signe d'une bonne combustion.

12.2. Les paramètres. — Les paramètres de la pompe sont : le diamètre du piston, la forme de la rampe supérieure, la forme de la rampe inférieure, la forme de came et la vitesse de rotation.

Ceux du clapet sont : la réaspiration, la raideur du ressort, le volume mort.

Ceux de la tubulure sont : la longueur et le diamètre intérieur.

Ceux du porte-injecteur sont : le ressort et le volume mort.

Ceux de l'injecteur sont : la pression de tarage, le recouvrement, le jeu du téton, la levée d'aiguille, la section de sortie, le différentiel, la longueur des trous d'injection, la longueur du *sackloch* (V. fig. XI-15).

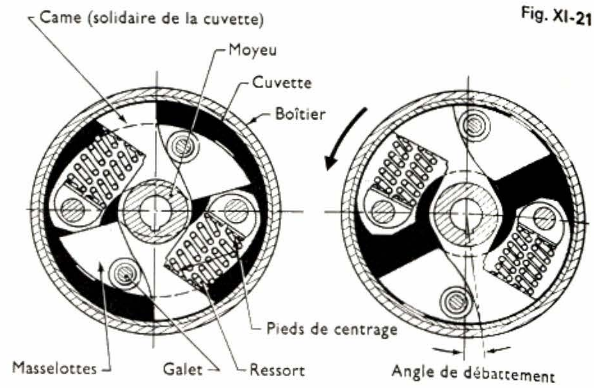
13. LES AVANCES AUTOMATIQUES

Compte tenu du délai d'inflammation du combustible, l'instant précis du début d'injection doit être avancé lorsque la vitesse de rotation augmente. Les avances automatiques usuelles permettent un décalage de l'arbre de la pompe de 10° par rapport à l'arbre d'entraînement (arbre à cames), ce qui correspond à un décalage de 20° pour le vilebrequin d'avance à l'injection.

Sous l'effet de l'inertie centrifuge, l'écartement de deux masses provoque, par l'intermédiaire d'un jeu de rampes inclinées, un décalage en rotation de l'arbre d'entrée par rapport à l'arbre de sortie (fig. XI-21).

Le dispositif d'avance automatique est généralement claveté sur l'arbre de la pompe et entraîné côté moteur par

Fig. XI-21



Position « avance nulle » Position « avance maxi »

un accouplement à griffes. Dans certains moteurs, l'avance est incorporée dans le moyeu du dernier pignon de la distribution entraînant la pompe à injection.

L'avance automatique, indispensable pour des moteurs à grande vitesse de rotation, est souvent supprimée sur des moteurs de tracteurs agricoles et industriels, tournant à faible vitesse.

14. LES RÉGULATEURS DE VITESSE ET DE COUPLE

Dans un moteur Diesel, la combustion a lieu toujours avec un grand excès d'air. Les deux variables, vitesse de rotation et couple moteur, ne sont liées par aucune relation naturelle. Si l'on veut limiter la vitesse de rotation il faut intervenir sur la quantité injectée, représentative du couple moteur.

Par ailleurs, l'ensemble du moteur et de la pompe seule est un système instable puisque le débit de la pompe d'injection augmente avec la vitesse de rotation.

14.1. Les fonctions d'un régulateur. — Les fonctions d'un régulateur sont les suivantes :

— limiter la vitesse de rotation du moteur lorsque le couple résistant diminue ou s'annule ;
— assurer une marche stable au ralenti ;
— réduire l'écart de vitesse entre la pleine charge et la marche à vide ;
— faciliter le départ à froid par un débit augmenté (surcharge) au démarrage ;
— modifier la courbe de débit naturelle de la pompe, pour obtenir la courbe de couple moteur souhaitée.

14.2. Les classes de régulateurs et leurs applications

14.2.1. « Mini-Maxi » ou limiteur de vitesse. — Pour cette classe de régulateurs, la position de l'accélérateur correspond à un couple affiché. Une liaison directe entre l'accélérateur et la crémaillère permet de doser le couple (fig. XI-22). Le débit injecté correspond à la loi naturelle de la pompe.

Applications : Il est utilisable lorsque le couple moteur doit être chaque instant adapté au couple résistant, lorsqu'il est nécessaire de contrôler le couple de deux ou plusieurs moteurs sur un même véhicule, lorsqu'une seule vitesse de régulation est nécessaire.

14.2.2. « Toutes vitesses ». — Pour cette classe de régulateurs la position de l'accélérateur correspond à une vitesse affichée. Le débit injecté est dosé et, en conséquence, le couple nécessaire pour maintenir cette vitesse de rotation l'est aussi.

Applications : Il est utilisé lorsqu'il faut stabiliser la vitesse du moteur à diverses valeurs, quelle que soit la charge.

14.3. Les principes de détection de vitesse des régulateurs

Pneumatiques : la dépression du collecteur d'admission agit sur une membrane commandant la crémaillère.

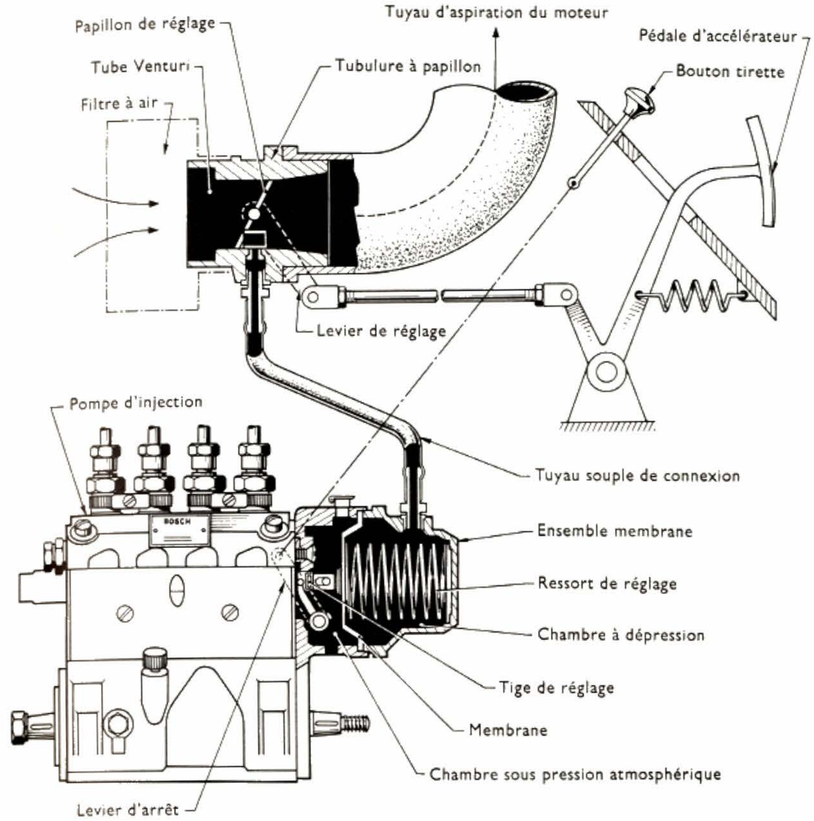


Fig. XI-22

Schéma d'installation du régulateur pneumatique

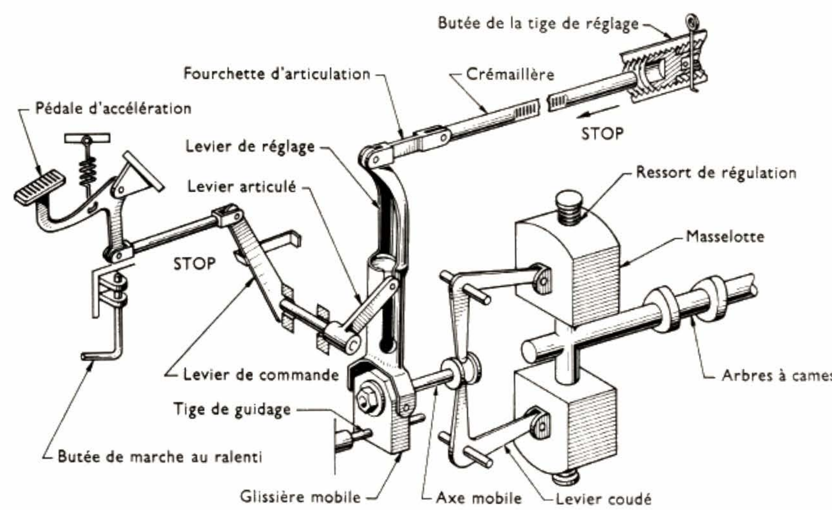


Fig. XI-23

Principe de fonctionnement d'un régulateur mécanique

Mécaniques : selon le principe du régulateur à boules.

Mécaniques à assistance hydraulique : pour une sensibilité et une capacité de travail supérieures ce sont des régulateurs mécaniques légers, donc sensibles, dotés d'un amplificateur d'effort hydraulique.

Hydrauliques : la pression fournie par une pompe hydraulique varie en fonction de la vitesse de rotation lorsqu'on étrangle la tubulure de refoulement.

Électriques : un alternateur ou une dynamo tachymétrique délivre des signaux dont une caractéristique au moins est proportionnelle à la vitesse de rotation (fréquence ou valeur efficace dans le cas d'un alternateur, amplitude dans le cas d'une dynamo).

14.4. Exemples de réalisations - Avantages et inconvénients

14.4.1. Les régulateurs pneumatiques (fig. XI-22)

1° *Avantages :* simples, peu coûteux, ne s'usant que faiblement.

2° *Inconvénients :* peu fidèles, peu précis, sensibles à l'état mécanique du moteur, peu puissants, ne peuvent pas toujours être utilisés si la courbe de dépression du moteur est impropre.

14.4.2. Les régulateurs mécaniques

1° *Principe de fonctionnement* (fig. XI-23, et XI-25). Pour déplacer les organes de commande, il faut que les masselottes exercent une certaine force, afin de comprimer le ressort. Entre la vitesse d'équilibre et la vitesse de début ou de fin de régulation, existe donc un certain écart qu'on appelle « statisme ».

Les nombreux perfectionnements adoptés visent à réduire ce statisme, source de fatigue mécanique, d'irrégularité de fonctionnement et d'imprécision.

2° *Avantages :* précis, assez fidèles, insensibles à l'état mécanique du moteur, apportent une bonne stabilité au ralenti, puissance acceptable, nombreuses possibilités de correction de la loi d'injection.

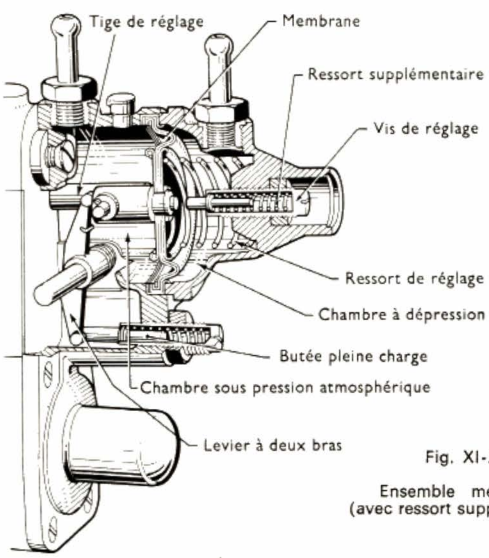


Fig. XI-24

Ensemble membrane (avec ressort supplémentaire)

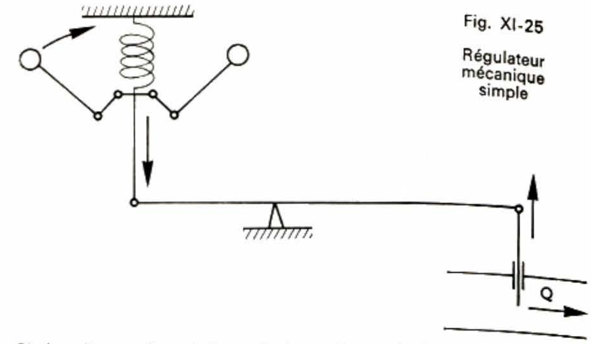


Fig. XI-25

Régulateur mécanique simple

Si la vitesse de rotation diminue, il en résulte les déplacements indiqués par les flèches et une augmentation du débit. Ainsi la vitesse est rétablie automatiquement.

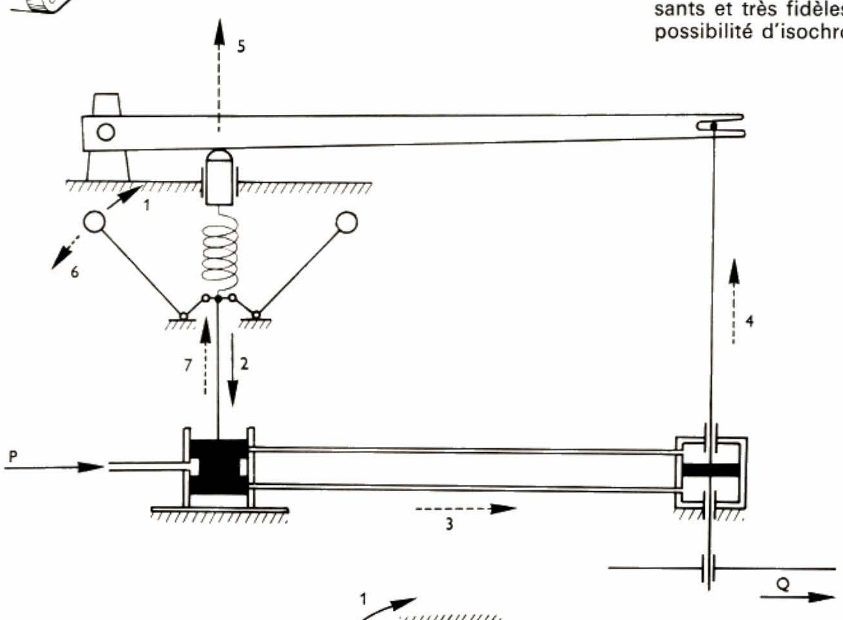


Fig. XI-26

Régulateur mécanique à assistance hydraulique avec contre-réaction

Si la vitesse de rotation diminue, on observe les déplacements indiqués par les flèches 1 et 2, ce qui entraîne l'admission de fluide comme le précise la flèche 3. Il en résulte une augmentation de vitesse et les déplacements figurés par les flèches 4, 5, 6 et 7

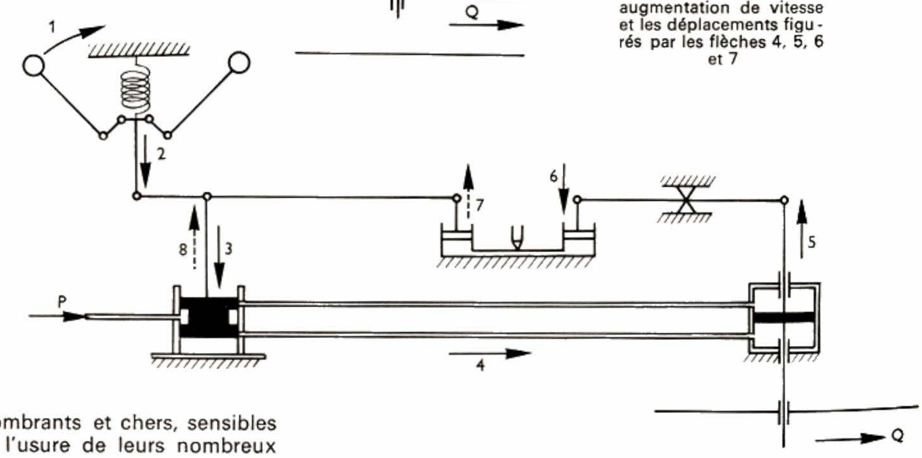


Fig. XI-27

Régulateur mécanique à assistance hydraulique (type isochrone)

Comme dans les figures précédentes, les numéros indiquent les sens de déplacement des diverses parties du régulateur lorsque la vitesse de rotation diminue.

3° *Inconvénients :* encombrants et chers, sensibles aux jeux d'entraînement et à l'usure de leurs nombreux organes de liaison.

14.4.3. Les régulateurs mécaniques à assistance hydraulique

1° *Principe de fonctionnement :*

— *Modèle simplifié :* Un dispositif à contre-réaction permet de ramener les masselottes à leur position d'équilibre. Toutefois, le déphasage peut entraîner un certain pompage, c'est-à-dire une instabilité cyclique (fig. XI-26).

— *Modèle isochrone :* la contre-réaction variable est obtenue par l'intermédiaire d'un élément déphaseur à amortissement réglable. On évite ainsi les risques de pompage (fig. XI-27 et XI-28).

2° *Avantages :* très précis, de faible inertie, très puissants et très fidèles, pièces actives peu sujettes à l'usure, possibilité d'isochronisme, excellentes performances, peuvent être dotés de nombreux perfectionnements : détection de charge, télécommande, etc.

3° *Inconvénients :* très chers (dix fois le prix d'un régulateur mécanique simple). Ne peuvent donc être utilisés de ce fait que sur des ensembles très importants.

14.4.4. Les régulateurs hydrauliques (fig. XI-28)

1° *Avantages :* absence d'inertie, très bon ralenti.

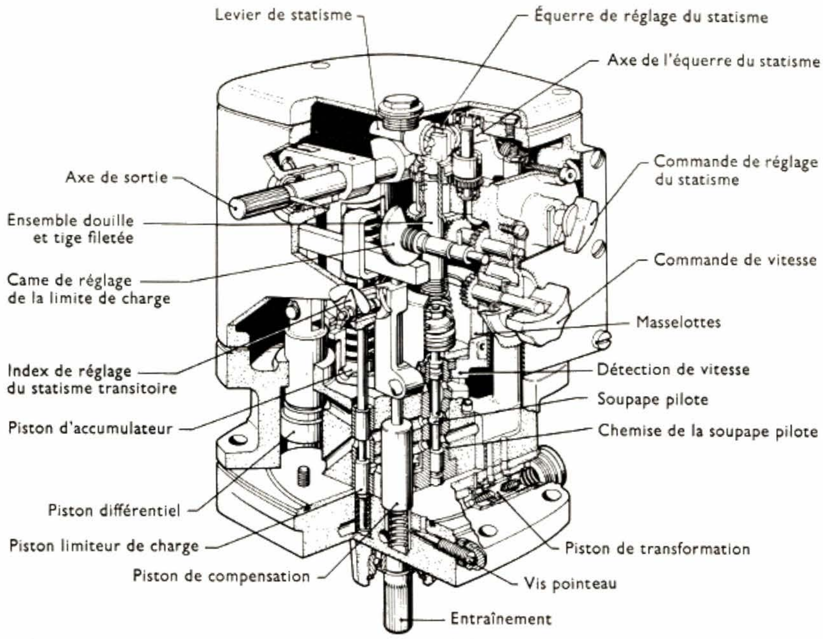


Fig. XI-28

Régulateur hydraulique (mécanique à amplification hydraulique) (*R. Bosch*)

2° *Inconvénients :* difficulté de détection, sensibilité à la température, faible précision.

14.4.5. Les régulateurs électriques

1° *Avantages :* grande souplesse d'adaptation, nombreux composants statiques, très bonnes performances.

2° *Inconvénients :* prix de revient élevé par rapport au régulateur mécanique.

14.5. Compléments théoriques sur la régulation-Définition des termes usuels

Capacité de travail. — *F.d* (*F*: force utile; *d*: déplacement). — Elle est exprimée généralement en fonction d'une certaine variation de vitesse ou pour la course utile du régulateur (*d*).

Fidélité. — C'est l'aptitude à rétablir la même vitesse lorsque le couple résistant reprend la même valeur (fig. XI-29). Avec un régulateur mécanique, la fidélité diminue aux basses vitesses. Cela vient du fait que l'énergie diminue aux faibles vitesses de rotation (variation cubique). Avec un régulateur mécanique à amplificateur hydraulique, la largeur de bande est constante car les masselottes reviennent à la même position.

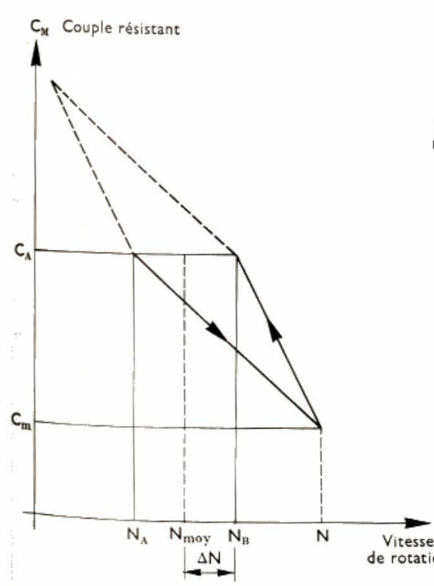


Fig. XI-29

Fidélité d'un régulateur de vitesse

La baisse du couple résistant de C_A en C_m entraîne l'augmentation de la vitesse de N_A en N. Le retour de couple résistant à C_A provoque la réduction de vitesse à N_B. On définit la fidélité par le quotient :

$$F = \frac{N_B + N_A}{2(N_B - N_A)} = \frac{N}{2\Delta N}$$

Statisme. — C'est la variation relative de vitesse entre deux états de charge (pleine charge et charge nulle généralement ; fig. XI-30).

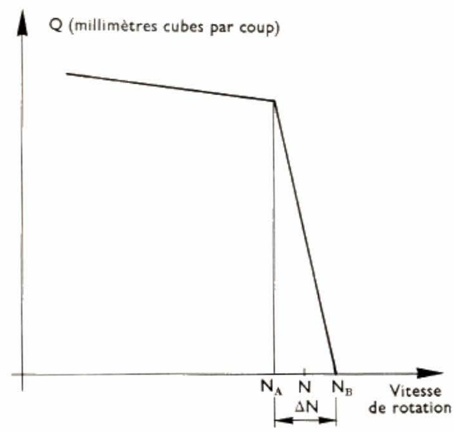


Fig. XI-30

Statisme

On définit le statisme par le quotient :

$$S = \frac{\Delta N}{\frac{N_A + N_B}{2}} = \frac{\Delta N}{N}$$

Puissance. — L'évolution des moteurs Diesel et les exigences croissantes des utilisateurs entraînent une demande de puissance accrue aux régulateurs.

Les pompes d'injection, dont la taille est liée à celle des moteurs, exigent un effort de commande à la crémaillère de plus en plus important. Les masses en mouvement des moteurs s'allègent relativement ce qui entraîne des accélérations très grandes en cas de variation de vitesse. Il faut donc agir très vite sur l'organe de réglage. De plus, les utilisateurs demandent une régulation de vitesse de plus en plus précise, notamment pour les groupes électrogènes.

Il faut donc des régulateurs à la fois sensibles, fidèles et puissants, caractéristiques impossibles à réunir avec un régulateur mécanique conventionnel. En revanche, un régulateur à amplification hydraulique présente une grande fidélité (voisine de 500 à 1 000) et permet d'appliquer le plein effort de réglage dès le début de la détection de variation de vitesse.

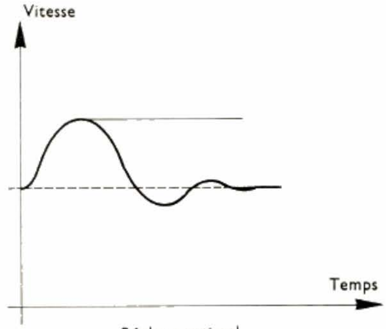


Fig. XI-31

Temps de rétablissement. — Le retour à l'état d'équilibre stable après chaque variation de charge est réalisé en réglant le dispositif d'amortissement afin d'obtenir un mouvement pseudopériodique (fig. XI-31).

15. LES POMPES ROTATIVES OU DISTRIBUTRICES

15.1. La naissance de la pompe rotative. — Ces pompes sont essentiellement le fruit des exigences croissantes des moteurs vis-à-vis de leur dispositif d'injection. Les moteurs modernes de petite et moyenne cylindrée (sur véhicules de tourisme et utilitaires) devenant de plus en plus compacts et nécessitant des dispositifs d'avance et de régulation comparativement plus précis ont conduit les spécialistes de l'injection à concevoir des pompes nouvelles, satisfaisant ces exigences contradictoires.

La pompe distributrice regroupe en effet, sous un volume restreint, et à un prix intéressant par rapport à la pompe en ligne : une pompe d'injection compacte, un dispositif de distribution, un régulateur hydraulique « toutes vitesses » ou mécanique, une avance hydraulique ou mécanique, une pompe d'alimentation.

15.2. Comparaison de la pompe distributrice et de la pompe en ligne

Dans la pompe distributrice on retrouve les mêmes fonctions que celles des équipements avec pompe en ligne mais les organes sont regroupés en un ensemble compact, à carter unique.

Toutefois un piston unique permet l'injection successivement dans les diverses tubulures et remplace les éléments d'injection de la pompe en ligne, en nombre égal à celui des pistons du moteur Diesel.

Les modèles de pompes distributrices commercialisées à ce jour se distinguent essentiellement par :

— *Le dispositif d'injection* sous haute pression, qui est :

- soit à piston unique avec came axiale et distributeur rotatif ;
- soit à pistons doubles avec came radiale et distributeur rotatif.

— *Le dispositif distributeur,* permettant de refouler successivement le gasoil dans chaque tubulure d'injection.

— *Le dispositif régulateur* qui est :

- soit mécanique mais miniaturisé ;
- soit hydraulique et de conception originale (par exemple : emploi d'une « butée liquide ») (V. illustrations page suivante).

16. VÉRIFICATION DES POMPES ET DES ÉQUIPEMENTS D'INJECTION

16.1. Équipement déposé. — Il s'agit, dans ce cas, de simuler à nouveau des conditions de fonctionnement se rapprochant de la réalité.

16.1.1. Contrôle de la pompe d'injection complète, avec avance automatique, régulateur, pompe d'alimentation et injecteurs. — On utilise, à cet effet, un banc (fig. XI-32) permettant d'entraîner la pompe d'injection à diverses vitesses et de relever le débit aux injecteurs.

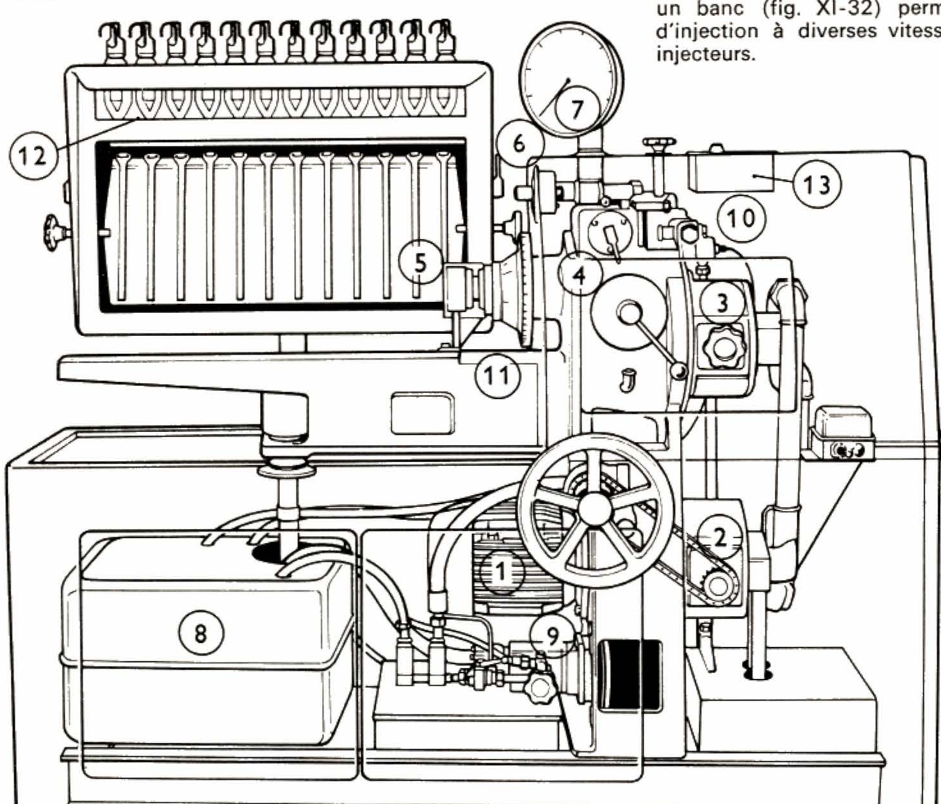
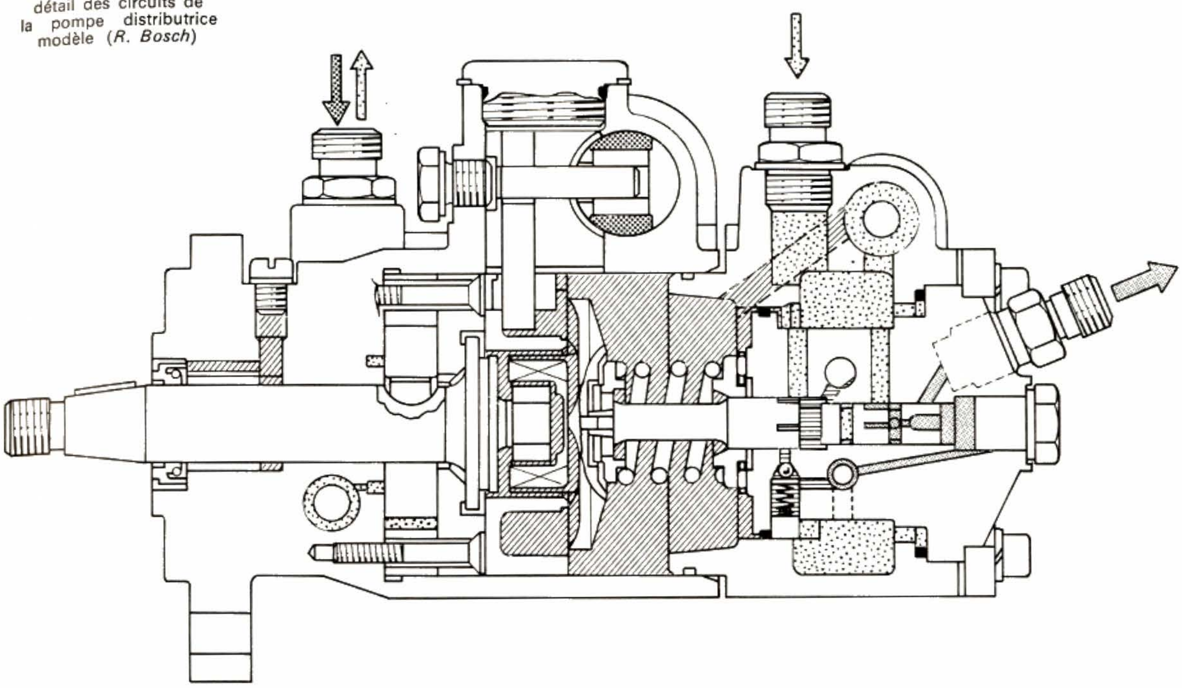
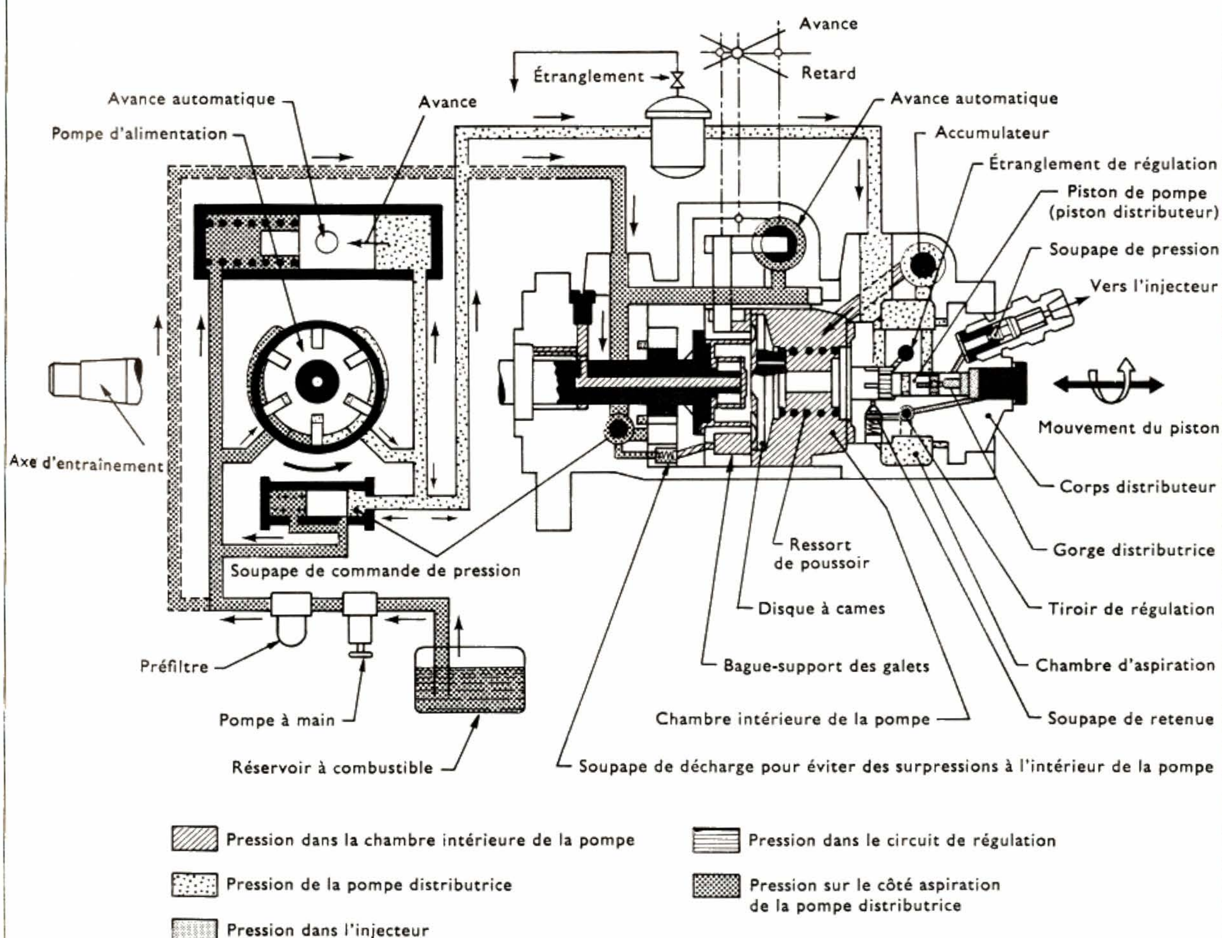


Fig. XI-32

1. Moteur d'entraînement
2. Pompe hydraulique
3. Moteur hydraulique
4. Boite de vitesses
5. Accouplement de pompe sans jeu
6. Prise de mouvement normalisée par tachymètre
7. Tachymètre
8. Réservoir d'huile d'essai
9. Pompe d'alimentation tandem comprenant une pompe de 1 litre et une pompe de 16 litres
10. Vanne de réglage
11. Raccords d'amenée d'huile et de dépression
12. Porte-éprouvettes avec porte-injecteurs
13. Compte-coups à déclenchement automatique

Vue en coupe et détail des circuits de la pompe distributrice modèle (*R. Bosch*)





Un tel banc doit être prévu :

— de grande puissance pour garantir une vitesse d'entraînement stable, même si la charge varie ;

— d'inertie suffisante pour assurer la régularité d'entraînement de la pompe, dont le couple résistant varie en « dent de scies » ;

— avec la possibilité de faire varier la vitesse depuis zéro jusqu'à la vitesse maximale, en donnant, même à vitesse nulle, un couple important ;

— avec des dispositifs auxiliaires pour alimenter la pompe en gasoil sous pression, contrôler le développement de l'avance automatique et mesurer, de façon précise, la vitesse d'entraînement et le débit refoulé par chaque injecteur.

16.1.2. Contrôle des injecteurs seuls, avec ou sans leur porte-injecteurs. — Une pompe manuelle à haute pression, dite « pompe à tarer les injecteurs », permet d'alimenter l'injecteur avec du gasoil sous pression. La pression d'ouverture est lue sur un manomètre tandis que le diagnostic de l'état de l'injecteur est fait en fonction de la forme et de la régularité du jet de gasoil pulvérisé, ainsi que de la fréquence d'oscillation de l'aiguille de l'injecteur, appelée « ronflement », examinée à diverses vitesses obtenues en faisant varier la cadence de la pompe à main. Il est à noter que le critère du ronflement n'a qu'une valeur toute relative, l'injecteur n'étant pas dans les mêmes conditions de fonctionnement que dans le moteur (absence de contre-pression).

Pour des contrôles à grande cadence, on utilise également des « bancs pour injecteurs » possédant une pompe entraînée par moteur électrique.

Pour des études plus poussées, ont été mis au point des dispositifs permettant de recréer une contre-pression à l'injecteur, la pression d'injection instantanée étant relevée par un capteur et lue directement sur un galvanomètre ou un oscilloscope. L'intégration des courbes de pression, en fonction du temps, donne le débit total injecté au cours d'un cycle.

16.2. Équipement en place sur moteur. — Des dispositifs, dits de « diagnostic », permettent de relever quelques paramètres dont peut dépendre le bon fonctionnement du moteur Diesel. Il faut noter toutefois que la difficulté des mesures sur un circuit hydraulique subissant des variations cycliques à fréquence relativement élevée réside d'abord dans la recherche des moyens d'investigation dont la mise en place ne modifie pas le phénomène lui-même.

Un diagnostic efficace a pour but de localiser la ou les sources des perturbations, avec le maximum de précision, afin de réduire les frais de démontage inutile. Les fabricants d'appareils de mesure s'efforcent de relever les paramètres suivants : le calage angulaire initial (début d'injection au ralenti), le développement de l'avance automatique (variation du point d'injection en fonction de la vitesse et éventuellement de la charge), le tarage (pression d'ouverture des injecteurs), la pression de pointe et les oscillations à la retombée de l'aiguille d'injecteur, le bon fonctionnement des clapets de retenue de la pompe d'injection.

17. TENDANCES DE L'ÉVOLUTION DES ÉQUIPEMENTS D'INJECTION

La puissance spécifique des moteurs modernes, de plus en plus compacts, est en augmentation constante. De ce fait, les équipements d'injection doivent suivre la même évolution, tout en offrant des possibilités supérieures :

— Les injecteurs voient leurs dimensions diminuer et certains modèles indémontables permettent encore de gagner quelques millimètres en diamètre.

— Les pompes d'injection deviennent également plus compactes, notamment les pompes distributrices regroupant, sous un faible volume, la pompe d'injection, l'avance automatique, la pompe d'alimentation ainsi qu'un régulateur de vitesse très perfectionné.

— Les pompes en ligne, face à la concurrence des pompes distributrices, s'allègent également et donnent un débit supérieur à dimensions sensiblement égales.

— De plus, l'électronique tend à s'implanter également dans ce domaine, en apportant sa grande souplesse d'adaptation. Des solutions nouvelles sont trouvées pour assurer la liaison entre les organes de décision (calculateur analogique) et les dispositifs de commande (injecteur, etc.).

— La fiabilité générale tend à s'accroître. En 1970, aux États-Unis d'Amérique, des endurances de 300 à 500 000 km étaient fréquemment exigées pour des véhicules transporteurs routiers. Cette fiabilité remarquable est obtenue progressivement par une meilleure étude des produits, par le choix de matériaux de plus en plus adaptés, et par la qualité de l'usinage et de la finition que s'imposent les constructeurs de matériel d'injection.

18. GÉNÉRALITÉS SUR L'INJECTION D'ESSENCE

Jusque vers 1930 environ, l'injection d'essence a vécu de succès divers, mais il semble que son développement ait été freiné à chaque nouveau perfectionnement du carburateur. Les premiers moteurs à injection d'essence (du pétrole lampant à l'époque) construits en nombre ont vu le jour vers 1900 (moteurs Deutz). Puis, le carburateur à gicleurs de Maybach a remplacé le carburateur à « évaporation » et détrôné, par la même occasion, la pompe à injection. Malgré les progrès considérables de l'injection d'essence, notamment sur les moteurs d'aviation avant et pendant la première guerre mondiale, ses avantages ne furent jamais tels que le carburateur, sans cesse perfectionné, ne puisse l'égaler à brève échéance.

L'injection d'essence fut desservie en outre par les nombreuses difficultés tant d'ordre technologique (usinage des pièces de haute précision) que scientifique (connaissance trop lacunaire des lois régissant l'injection et la combustion).

Toutefois, à partir de 1930, l'étude et le développement des carburateurs ont fait de tels progrès qu'on a pu prévoir leurs limites d'utilisation. C'est depuis cette période qu'ont été entreprises, sur les moteurs à essence, des études très poussées pour exploiter les particularités qu'offrait l'injection d'essence par rapport à la carburation. Outre l'augmentation de la puissance spécifique, on trouve à l'injection d'essence toutes sortes d'avantages, comme la suppression des risques de « givrage » et d'incendie, ainsi que l'insensibilité à la position du moteur, avantage grandement exploité par les constructeurs de moteurs pour avions de l'époque : Daimler-Benz, Junkers, Bayerische Motoren Werke.

Vers 1960, l'injection directe, utilisant un équipement analogue à celui nécessité pour le moteur Diesel, a cédé le pas à l'injection indirecte (dans la tubulure d'admission), garantissant une robustesse et une facilité d'entretien supérieures.

L'injection directe est essentiellement mécanique, alors que l'injection indirecte peut être soit mécanique, soit à commande électronique. La difficulté principale, dans tout dispositif d'injection d'essence, réside dans la réalisation d'une régulation adaptée, permettant de doser de façon rigoureuse le rapport air/essence, et cela pour toutes les conditions d'utilisation où interviennent des paramètres aussi différents que la vitesse de rotation, la charge, la température du moteur, la température ambiante, la pression atmosphérique.

18.1. L'injection mécanique d'essence (directe et indirecte). — La technologie générale de la pompe est analogue à celle utilisée pour l'injection Diesel. Toutefois, la possibilité d'injecter sous des pressions plus faibles de 30 à 50 % (100 à 125 bars environ en injection directe et 10 à 30 bars en injection indirecte) et d'établir la phase d'injection sur un temps plus long, permet de limiter les dimensions de la pompe d'injection. La nécessité d'un dosage précis et d'un équilibrage rigoureux entre les divers cylindres entraîne toutefois des tolérances d'usinage très serrées et, par conséquent, une filtration également très poussée.

18.2. L'injection « électronique » d'essence. — Conçue et diffusée à une très large échelle par le constructeur Robert Bosch (système « Jetronic »), l'injection électronique a trouvé sa justification dans sa précision du dosage, nécessaire pour satisfaire les exigences des lois antipollution des marchés d'exportation (Test de Californie). Par ailleurs, sa souplesse d'adaptation aux performances du moteur et sa mise en place aisée dans le véhicule ont séduit les constructeurs automobiles.

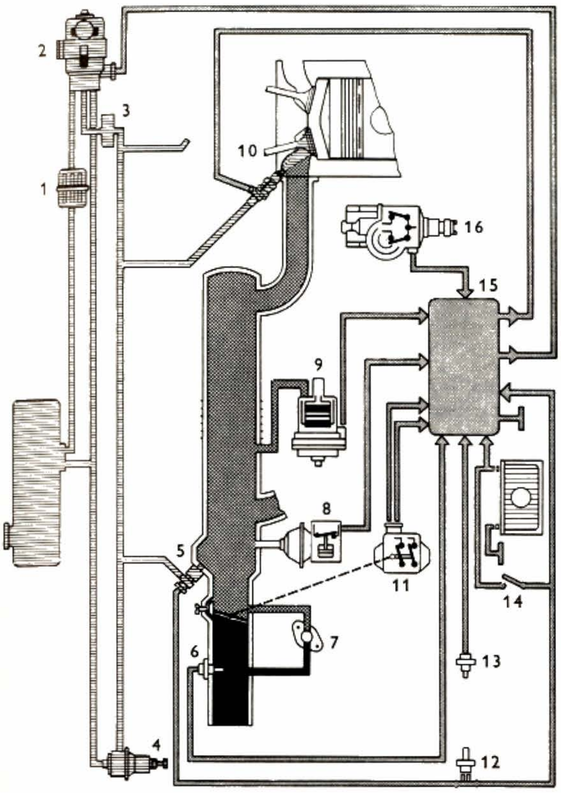


Fig. XI-33 a — Schéma d'ensemble du système

1. Filtre. — 2. Pompe. — 3. Bac compensateur. — 4. Régulateur de pression. — 5. Injecteur de départ à froid. — 6. Sonde de température dans le collecteur d'admission. — 7. Commande d'air additionnel. — 8. Interrupteur de pression. — 9. Sonde de pression. — 10. Injecteur. — 11. Injecteur de papillon. — 12. Thermocontact. — 13. Sonde de température. — 14. Commutateur d'allumage et de démarrage. — 15. Appareil de commande. — 16. Allumeur avec contact de déclenchement

Schématiquement, le système Jetronic se compose (fig. XI-33 a) :

— d'une pompe à essence à basse pression constante (2 bars) ;

— de soupapes d'injection électromagnétiques (injection indirecte) à temps d'ouverture variable ;

— d'organes de détection et d'élaboration d'informations d'entrée (ouverture des papillons, pression absolue dans le collecteur d'admission, température d'air et d'eau, vitesse de rotation, position angulaire, etc.) ;

— d'une centrale électronique de commande (calculateur analogique déterminant le temps d'ouverture des injecteurs en fonction des informations d'entrée).

Il est à noter que pour des raisons d'économie, les injecteurs sont commandés deux par deux (moteur quatre cylindres) ou trois par trois (moteur six cylindres ; fig. XI-33 b). L'essence est donc stockée devant la soupape d'admission, jusqu'à l'ouverture de celle-ci. L'accélération brutale de l'air ainsi que l'étranglement au niveau de la soupape assurent une pulvérisation suffisante. Les liaisons entre les différents organes se font par fils électriques souples ou par tubulures flexibles pour l'essence. Il n'y a pas à prévoir d'entraînement par le moteur. Le calculateur, organe le plus encombrant, ainsi que la pompe à essence peuvent être logés au choix du constructeur. Le coût de l'ensemble Jetronic est inférieur à celui d'un équipement mécanique avec pompe en ligne perfectionné.

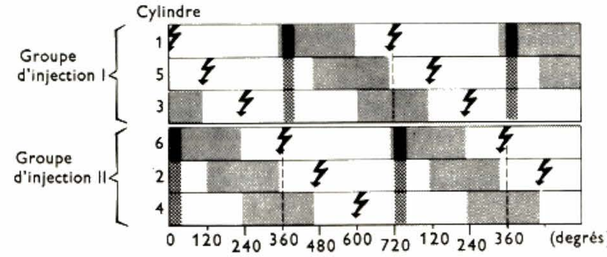


Fig. XI-33 b — Diagramme en fonction du temps

Ce diagramme montre, en fonction du temps, l'ordre successif de l'ouverture des soupapes d'admission, du début d'injection et du point d'allumage sur un moteur six cylindres : en bas, indication de la position en degrés de vilebrequin ; à gauche, les cylindres dans leur ordre d'allumage, formant les groupes I et II.
Les zones grises indiquent la phase d'ouverture des soupapes d'admission et donc la course d'admission.
Le point d'injection pour chacun des groupes de trois cylindres est indiqué par des points. Les éclairs figurent le point d'allumage.

18.3. Comparaison des injections directe et indirecte. — L'examen des courbes de puissance obtenues avec les deux systèmes montre que le gain de puissance donné par l'injection directe est minime (3 à 5 % environ) et ne justifie pas, sur des voitures particulières, le prix, la complication technique et les risques de pannes supplémentaires. Il en va différemment bien sûr pour des voitures de compétition où l'on recherche le gain maximal.

18.4. Comparaison de l'injection et de la carburation. — Le gain de puissance moyen à escompter lors de l'adaptation de l'injection indirecte sur un moteur à carburateur est voisin de 5 à 10 %, selon le degré de remplissage obtenu avec la version à carburateur. Des gains complémentaires peuvent être obtenus par l'adaptation soignée des paramètres de l'arbre à cames (croisement de soupapes) et par le choix d'une longueur de tubulure d'admission donnant le remplissage maximal pour la vitesse de rotation où l'on désire placer le couple maximal (tubulures accordées ; V. chap. 5 § 4).

De toute façon, à performances sensiblement égales ou supérieures, le moteur à injection garantit une meilleure souplesse de fonctionnement à toutes vitesses, ainsi qu'une consommation spécifique plus faible ; ces performances résultent de la meilleure répartition de l'essence dans chaque cylindre (égalité des richesses), du remplissage amélioré du fait de tubulures plus directes, au tracé libre de toute considération de formation de mélange gazeux et de l'absence de point chaud, rendu inutile par l'injection. Accessoirement, on constate une diminution de l'exigence en octane (2 à 3 points) autorisant un taux de compression supérieur, lui-même source d'un meilleur rendement thermodynamique. De plus, sur le plan de la pollution, on constate une diminution des imbrûlés, conséquence logique d'une bonne combustion. La contrepartie de ces avantages est un prix d'équipement plus élevé, ainsi qu'une mécanique plus délicate, nécessitant, en cas de panne, l'intervention d'un spécialiste.

Grâce à l'injection d'essence, on a assisté, sur certains moteurs d'aviation, entre 1935 et 1945, à un triplement de la puissance, tout en obtenant des consommations spécifiques voisines de 180 g/ch.h (environ 250 g/kWh).

19. LA TECHNOLOGIE DES POMPES MÉCANIQUES D'INJECTION D'ESSENCE ET DE LEUR ÉQUIPEMENT

Avant d'aboutir à des solutions originales, la majorité des chercheurs se sont efforcés de réutiliser les équipements employés pour l'injection Diesel. C'est ce qui justifie la similitude de certaines réalisations. Toutefois, l'utilisation d'essence apporte deux difficultés nouvelles du fait du

faible pouvoir lubrifiant de ce carburant et de sa tendance à la formation de bulles de vapeur.

19.1. Pompes distributrices. — Elles sont soit inspirées du modèle Diesel type EP/VA (R. Bosch) soit construites en version plus simple, tels les modèles de Lucas.

19.2. Pompes en ligne. — Là encore, on retrouve les deux tendances : d'une part, les modèles dérivés de la pompe Diesel avec des pistons décalés dans certains cas (pour réduire l'encombrement total), d'autre part, des pompes en ligne plus légères (type Kugelfischer ; fig. XI-34).

cultés de réglage et nécessite des pièces usinées avec une précision extrême.

19.4. Réseaux de courbes caractéristiques. — Une détermination point par point (réalisée sur banc moteur) de l'exigence en essence du moteur en fonction de l'ouverture du papillon et de la vitesse de rotation, conduit à tracer un réseau de caractéristiques. Il permet ultérieurement l'usinage de la came d'espace.

L'adaptation des diverses zones du réseau se fait selon divers critères qui sont, principalement, la puissance maximale, l'économie de consommation ou la pollution minimale (V. chap. 14).

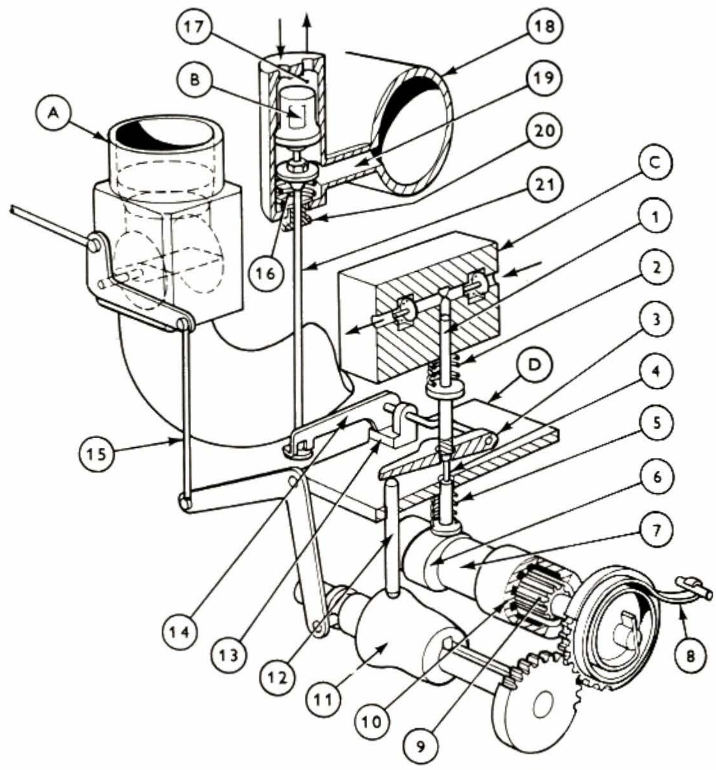


Fig. XI-34 — Schéma de principe (*Kugelfischer*)

A — Corps du papillon d'air
B — Élément thermostatique
C — Tête hydraulique
D — Système d'injection et de régulation

1 — Piston
2 — Ressort de piston
3 — Balancier
4 — Poussoir
5 — Ressort de poussoir
6 — Came de levée
7 — Arbre à cames
8 — Ressort antagoniste
9 — Noyau à barreaux aimantés
10 — Enveloppe
11 — Came de réglage
12 — Tige palpeuse
13 — Butée
14 — Levier d'enrichissement
15 — Bielle de liaison
16 — Ressort de l'élément thermostatique
17 — Chambre d'eau du répartiteur
18 — Répartiteur
19 — Passage d'air additionnel
20 — Soupape
21 — Tige de commande

Les pompes peuvent comporter un élément par cylindre moteur, ou seulement un élément pour deux ou trois cylindres moteur, avec des répartiteurs à deux ou trois voies.

19.3 Régulation. — La grande différence par rapport à l'nijection Diesel est que le volume d'air admis par le moteur est variable, commandé par l'ouverture d'un papillon. En effet, l'inflammation de l'essence nécessite une richesse (dosage essence-air) sensiblement constante. Il faut donc ajuster, en toutes circonstances, le débit de la pompe à la quantité d'air disponible. À chaque ouverture de papillon et à chaque vitesse de rotation correspond donc un débit déterminé, imposé par une came d'espace à deux dimensions, taillé point par point.

Il en résulte un « champ de caractéristiques » de débit, spécifique d'un moteur pour des conditions ambiantes définies (température et pression atmosphériques). Cela impose de corriger le débit en fonction de l'altitude et de la température du moteur, ce qui donne lieu à quelques diffi-

20. TENDANCES DE L'ÉVOLUTION DES ÉQUIPEMENTS D'INJECTION D'ESSENCE

De par leur conception et leur principe de fonctionnement, les pompes mécaniques, robustes et sûres, présentent plusieurs inconvénients majeurs : leur prix, leurs possibilités limitées quant à l'intégration de divers paramètres, leur précision moyenne, qui, dans le cadre des lois antipollution en vigueur depuis 1970 en Europe, rendent leur adaptation difficile à de grandes séries de véhicules. On se tourne donc vers des solutions de plus en plus électroniques, présentant une souplesse de fonctionnement et d'adaptation nettement supérieure, ainsi qu'un prix inférieur. Des solutions nouvelles, à base mécanique, se dessinent également cependant, visant à surclasser l'injection électronique, en ce qui concerne le prix de revient et la rusticité de fonctionnement. Compte tenu du dynamisme apporté à l'évolution de ces techniques, l'opposition carburation-injection est loin d'être terminée.

CHAPITRE XII

LA SURALIMENTATION

Parmi les moyens possibles, la suralimentation est sans doute le plus efficace pour augmenter la puissance spécifique d'un moteur. En effet, en dehors de ce procédé le motoriste peut soit améliorer le rendement global du moteur, mais il est très vite limité dans cette voie, soit augmenter la vitesse de rotation dans la mesure où la tenue mécanique, les vibrations, le niveau sonore, la combustion, etc., ne sont pas mis en cause par ces nouvelles conditions d'utilisation.

Le principe de la suralimentation est d'augmenter à l'aide d'un compresseur, entraîné mécaniquement par le moteur, ou bien d'un turbocompresseur utilisant l'énergie des gaz d'échappement, la masse d'air contenue dans le cylindre à la fermeture de l'orifice d'admission. La suralimentation permet d'améliorer légèrement le taux de remplissage du moteur mais elle intervient surtout pour augmenter la masse volumique de l'air à l'admission.

La suralimentation du moteur à allumage commandé entraîne des problèmes de combustion consécutifs à l'augmentation des pressions de cycle. C'est la raison pour laquelle elle est souvent limitée à une faible valeur, exception faite de cas spéciaux pour lesquels un carburant spécial (par exemple le méthanol) est utilisé. En revanche, son application au moteur Diesel est de ce point de vue très favorable : l'augmentation de la pression d'admission entraîne une réduction du délai d'inflammation donc une réduction du gradient instantané de pression de combustion, dont l'influence sur le rendement mécanique et sur le bruit est bien connue.

1. SURALIMENTATION PAR COMPRESSEUR ENTRAÎNÉ MÉCANIQUEMENT

Ce procédé consiste à utiliser un compresseur volumétrique ou centrifuge entraîné par le moteur. Le gain susceptible d'être ainsi obtenu dépend principalement du rapport de pression de suralimentation et du rendement adiabatique du compresseur, ces deux paramètres n'étant pas d'ailleurs indépendants.

Il est possible d'estimer l'accroissement de pression moyenne effective qui résulte de la suralimentation en calculant, d'une part, l'augmentation de pression moyenne indiquée et, d'autre part, le travail nécessaire à l'entraînement du compresseur.

Supposons que, par rapport au moteur atmosphérique :

a) Le rendement thermodynamique du moteur suralimenté soit inchangé (ce qui est rigoureux si les volumes caractéristiques du cycle sont les mêmes).

b) Le rendement de combustion et la richesse du mélange air-combustible soient conservés.

Désignons par :

p_{mi} : la pression moyenne indiquée ;
p_{me} : la pression moyenne effective ;
p, ρ, T : respectivement la pression, la masse volumique et la température de l'air admis dans le cas d'un cycle normal ;
η_m : le rendement mécanique du moteur ;
p_{mi}, p'_{me}, p', ρ', T', η'_m les grandeurs correspondantes relatives à un cycle avec suralimentation.

Par ailleurs appelons :

τ_c : le travail absorbé par le compresseur par unité de masse d'air admis ;
m : la masse d'air admis par cycle ;
V : la cylindrée du moteur.

Le rapport des pressions moyennes indiquées avec et sans suralimentation a pour valeur :

$$\frac{p'_{mi}}{p_{mi}} = \frac{\rho'}{\rho}$$

La pression moyenne effective avec suralimentation est égale à :

$$p'_{me} = p'_{mi}\, \eta'_m - \frac{m\, \tau_c}{V}$$

Or : $$m = \rho' V \quad \text{et :} \quad p'_{mi} = p_{mi} \cdot \frac{\rho'}{\rho}$$

d'où : $$p'_{me} = \frac{\rho'}{\rho}\, (p_{mi}\, \eta'_m - \rho \tau_c)$$

Comme par ailleurs : $p_{mi} = \dfrac{p_{me}}{\eta_m}$

nous obtenons finalement : $p'_{me} = \dfrac{\rho'}{\rho}\, \left(p_{me} \cdot \dfrac{\eta'_m}{\eta_m} - \rho\, \tau_c\right)$

La valeur du rendement mécanique η'_m ne tient évidemment pas compte du travail fourni au compresseur qui est compté séparément. En revanche η'_m est supérieur à η_m du fait de la récupération d'un travail positif pendant la phase d'admission et d'une réduction relative des pertes par frottements mécaniques. Nous pouvons expliciter la formule ci-dessus en calculant la valeur de $\dfrac{\rho'}{\rho}$ et de $\rho\tau_c$.

Pour simplifier prenons le rapport des températures $\dfrac{T'}{T}$ égal au rapport des températures régnant au refoulement et à l'aspiration du compresseur.

Il vient : $$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{p'}{p} \cdot \frac{T}{T'}$$

Si T_1 est la température qui résulterait de la compression adiabatique de l'air et si η_c est l'efficacité du compresseur :

$$T' - T = \frac{1}{\eta_c}\, (T_1 - T) = \frac{1}{\eta_c}\, T \left[\left(\frac{p'}{p}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

D'où : $$\frac{T'}{T} = 1 + \frac{1}{\eta_c}\left[\left(\frac{p'}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]$$

et : $$\frac{\rho'}{\rho} = \frac{p'}{p} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{\eta_c}\left[\left(\frac{p'}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]}$$

Quant au travail absorbé par le compresseur, si R est la constante des gaz parfaits, il a pour valeur :

$$\tau_c = \frac{\gamma R}{\gamma - 1}(T' - T)$$

En remplaçant $T' - T$ par sa valeur nous pouvons écrire :

$$\rho \tau_c = p \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{1}{\eta_c}\left[\left(\frac{p'}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]$$

et en posant : $\frac{1}{\eta_c} \cdot \left[\left(\frac{p'}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right] = f(r_p)$ avec $r_p = \frac{p'}{p}$

nous déduisons :

$$p'_{me} = \frac{r_p}{1 + f(r_p)} \cdot \left[p_{me}\frac{\eta'_m}{\eta_m} - p\frac{\gamma}{\gamma - 1} f(r_p)\right]$$

Exemple d'application :

Considérons un moteur suralimenté développant en version atmosphérique une pression moyenne effective de 10 bars et supposons que le rapport $\frac{\eta'_m}{\eta_m}$ prenne les valeurs indiquées dans le tableau ci-après en fonction du taux de suralimentation. À partir des caractéristiques d'un compresseur volumétrique déterminées expérimentalement, nous obtenons les résultats suivants :

r_p	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
η_c	0,775	0,67	0,615	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46
$\frac{\eta'_m}{\eta_m}$	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
p'_{me}	10,6	11,0	11,4	11,6	11,8	11,9	12,0	12,0
$\frac{p'_{me}}{p_{me}}$	1,06	1,10	1,14	1,16	1,18	1,19	1,20	1,20

Dans ces conditions de calcul, l'accroissement de la pression moyenne effective qui résulte de la suralimentation passe par une valeur maximale pour un rapport de pression de 1,7. Le bénéfice à attendre de la suralimentation par compresseur entraîné mécaniquement est donc assez vite limité du fait que le moteur ne récupère qu'une partie de plus en plus faible (en valeur relative) du travail absorbé par le compresseur.

Ce procédé a cependant fait l'objet de nombreuses applications sur les moteurs à quatre temps et a souvent été utilisé pour le balayage de certains types de moteurs à deux temps.

2. SURALIMENTATION PAR TURBOCOMPRESSEUR

Le Français Rateau a été le premier à démontrer la possibilité de réaliser la suralimentation par un turbocompresseur utilisant l'énergie des gaz d'échappement et sans emprunter aucune partie de la puissance développée par le moteur, pourvu que le produit des rendements du compresseur et de la turbine soit voisin de 50 %. Pour montrer cette possibilité, il suffit de calculer le travail du compresseur et celui de la turbine et d'écrire que le bilan des travaux est nul.

Appelons :

τ_c et η_c : le travail et l'efficacité du compresseur ;
τ_T et η_T : le travail et l'efficacité de la turbine ;
p_a : la pression de suralimentation ;
p_e : la contre-pression d'échappement ;
T_e : la température des gaz d'échappement à l'entrée turbine ;
p, T : la pression et la température de l'air à l'admission du compresseur ;
γ et γ' : les coefficients adiabatiques de l'air et des gaz brûlés ;
R : la constante des gaz parfaits ($R = 8{,}314$ J/K.mol).

Le travail absorbé par le compresseur a pour valeur :

$$\tau_c = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{RT}{\eta_c}\left[\left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]$$

et celui de la turbine :

$$\tau_T = \frac{\gamma'}{\gamma' - 1}\eta_T RT_e\left[1 - \left(\frac{p}{p_e}\right)^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}}\right]$$

En écrivant que τ_c doit être égal à τ_T nous obtenons :

$$\eta_c \eta_T \frac{T_e}{T} = \frac{\gamma}{\gamma'} \cdot \frac{\gamma' - 1}{\gamma - 1} \cdot \frac{\left[\left(\frac{p_a}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]}{\left[1 - \left(\frac{p}{p_e}\right)^{\frac{\gamma'-1}{\gamma'}}\right]}$$

Prenons pour exemple :

$$\frac{p_a}{p} = \frac{p}{p_e} = 2,\ \gamma = 1{,}4,\ \gamma' = 1{,}3$$

nous obtenons : $\eta_c \eta_T \frac{T_e}{T} = 1{,}20$; comme les températures d'échappement d'un moteur Diesel fonctionnant à pleine injection ne sont pas inférieures à 450 °C (723 K), pour une température ambiante de 303 K nous avons : $\frac{T_e}{T} = 2{,}4$

d'où : $$\eta_c \cdot \eta_T = 0{,}5$$

En fait, l'expérience montre qu'avec les turbocompresseurs actuellement mis sur le marché la surpression à l'admission peut dépasser largement la contre-pression d'échappement ce qui permet d'obtenir un balayage efficace du cylindre et une réduction des températures de parois ainsi que l'évacuation totale des gaz brûlés contenus dans le volume mort.

Deux améliorations permettent encore d'augmenter le bénéfice à attendre de la forte suralimentation par turbocompresseur ; il s'agit :

— du refroidissement de l'air d'admission entre compresseur et moteur qui élève la masse volumique de l'air admis ;
— de l'utilisation de l'énergie de la bouffée d'échappement.

3. COMPRESSEURS DE SURALIMENTATION

3.1. Compresseurs volumétriques

Il en existe de différents types parmi lesquels nous citerons :

— les compresseurs volumétriques alternatifs (compresseur à pistons Dugelay, pulso-compresseur Momy, etc.) ;
— les compresseurs volumétriques rotatifs (compresseur R. Planche, compresseurs à palettes Cozette, compresseurs Roots, etc.).

La description de tous ces appareils sortirait du cadre de cet article. Nous nous limiterons à la description du compresseur Roots dont l'emploi a été le plus fréquent.

Le compresseur Roots (fig. XII-1) est une pompe à engrenages composée d'un carter dans lequel tournent, autour de deux axes parallèles, deux rotors à deux, trois ou quatre dents conjugués entre eux. Les profils des dents (également appelées lobes) sont généralement des épicycloïdes. Les deux rotors ne se touchent pas et sont conjugués au moyen d'engrenages disposés dans un carter séparé. Pour éviter le frottement entre les lobes et le carter on maintient un jeu de 0,1 à 0,15 mm qui entraîne évidemment des fuites et une diminution du rendement volumétrique, surtout pour les faibles vitesses de rotation et les fortes pressions. Il convient de remarquer que le compresseur Roots ne comprime pas l'air emmagasiné dans les alvéoles mais qu'il permet seulement son transvasement de l'admission au refoulement.

À titre d'exemple la figure (XII-2) montre l'évolution du rendement volumétrique et de l'efficacité adiabatique d'un compresseur Roots à trois lobes, en fonction de la vitesse de rotation et du rapport des pressions de refoulement et

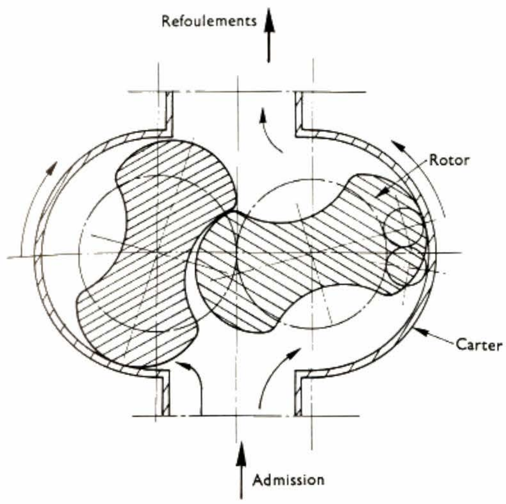


Fig. XII-1

Coupe schématique d'un compresseur Roots à deux rotors

d'admission. L'évolution des courbes montre bien que ce type de compresseur n'est pas apte à fournir des grands rapports de pressions avec un bon rendement. Malgré tout, sa grande simplicité l'a souvent fait préférer à des machines de meilleurs rendements mais de réalisation plus complexe.

3.2. Turbocompresseurs (fig. XII-3). — Un turbocompresseur se divise en deux parties principales : la partie compresseur et la partie turbine.

La partie fixe est un carter qui comprend :

— *Côté compresseur :* l'orifice d'admission d'air, le diffuseur, l'orifice de refoulement (non représenté sur la figure).

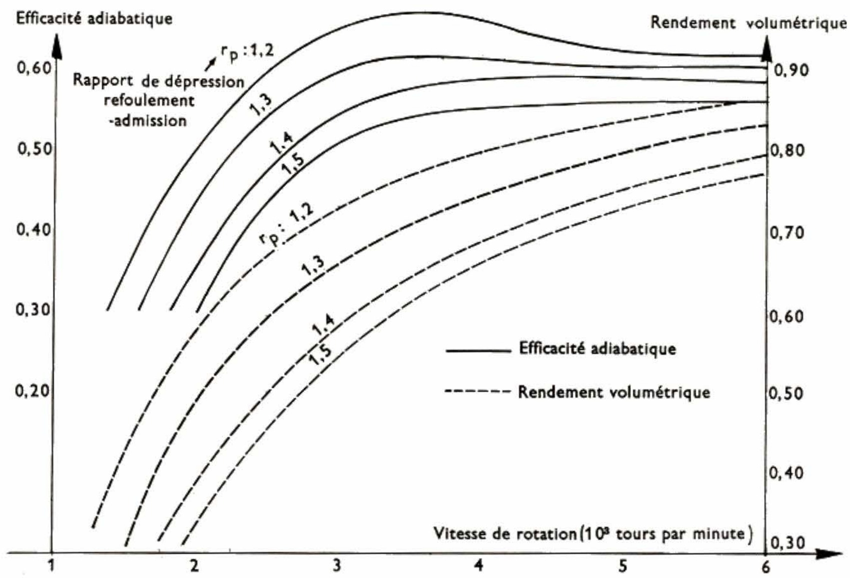
— *Côté turbine :* l'orifice d'admission de gaz d'échappement, le distributeur, l'orifice d'échappement.

La partie mobile est un ensemble rotatif constitué par la roue du compresseur, la roue de turbine et l'arbre de liaison.

Le compresseur est toujours du type centrifuge ce qui permet d'obtenir un rapport de pressions élevé avec un seul étage. De plus, ce type de compresseur est relativement peu sensible aux imperfections de forme, ce qui, tout compte fait, le rend moins volumineux et moins cher que le compresseur axial.

Fig. XII-2

Évolution de l'efficacité adiabatique et du rendement volumétrique d'un compresseur Roots



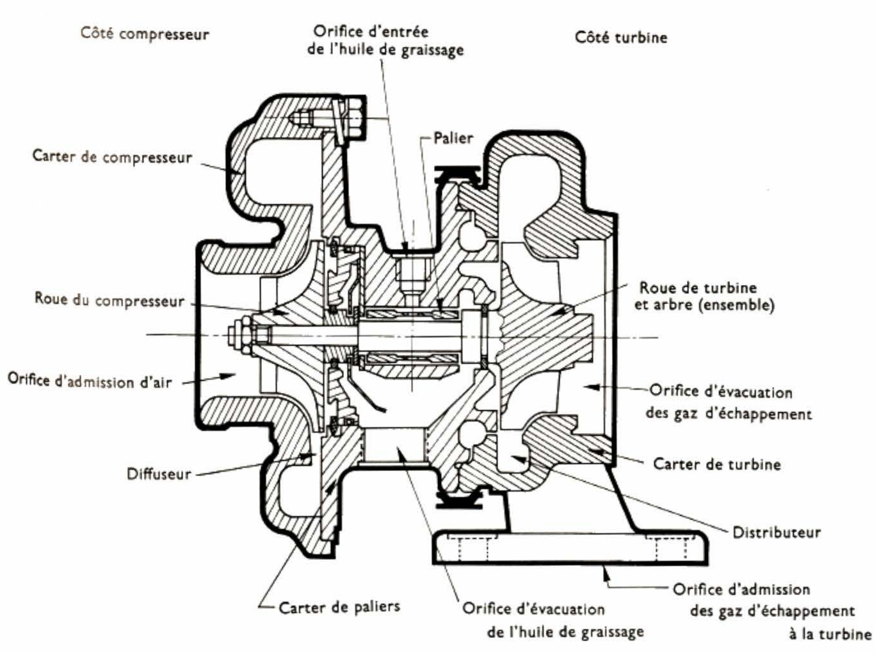


Fig. XII-3

Coupe d'un turbocompresseur Holset

La turbine est du type axial pour les grosses unités et du type centripète pour les petits turbocompresseurs car le rendement des petites turbines axiales est insuffisant.

Les caractéristiques fondamentales d'un turbocompresseur sont : le volume d'air débité mesuré à l'aspiration du compresseur et le rapport de pressions développé par le compresseur (pour une température et une pression déterminées à l'aspiration et une puissance donnée disponible dans les gaz d'échappement).

La figure XII-4 montre les courbes caractéristiques d'un compresseur centrifuge en fonction du débit d'air délivré. À une puissance donnée du moteur turbosuralimenté correspond un point de fonctionnement du compresseur défini par le diagramme de ses caractéristiques. Lorsque les conditions de fonctionnement du moteur sont variables le

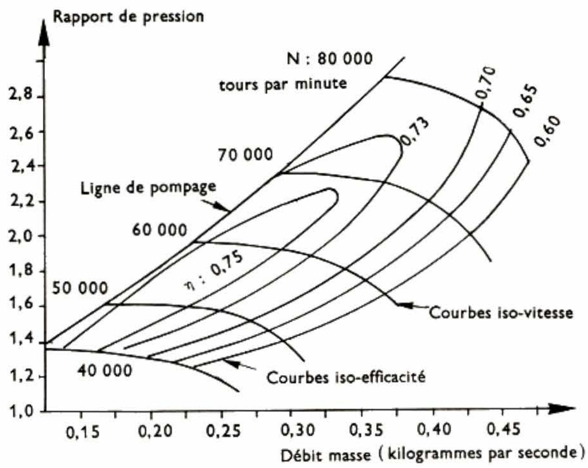


Fig. XII-4 — η_a : efficacité adiabatique ; N : fréquence de rotation en tours par minute

lieu décrit par les points d'utilisation est une courbe d'allure parabolique variable selon le type d'utilisation du moteur (V. § 4.2). La courbe qui limite vers la gauche les caractéristiques du compresseur est appelée ligne de pompage. Il importe qu'aucun des points de fonctionnement ne sorte de cette limite car faute de respecter cette condition la pression au refoulement du compresseur peut présenter des variations d'amplitude très brutales. Ce phénomène est particulièrement à craindre dans les applications de turbocompresseur aux moteurs Diesel à régime variable.

4. PROCÉDÉS DE SURALIMENTATION

4.1. Dispositifs à compresseur entraîné mécaniquement

4.1.1. Surpresseur débrayable « M.M. » (fig. XII-5). — Ce dispositif mis au point par la société Le Moteur Moderne concerne la suralimentation intermittente des moteurs à allumage commandé en fonction du besoin de puissance. Il se compose de deux éléments principaux :

— Le circuit d'air d'alimentation du moteur qui se partage en deux circuits dérivés :

- le circuit normal d'alimentation à pression atmosphérique ;
- le circuit haute pression avec le compresseur.

— Un système de mise en action automatique qui comprend un embrayage électromagnétique et le circuit électrique de commande.

Principe de fonctionnement. — Pour toutes les positions de la commande d'ouverture de l'admission du moteur, excepté la position correspondant à la pleine charge, l'embrayage n'est pas alimenté et le compresseur n'étant pas entraîné il n'absorbe pas de puissance. Le moteur s'alimente alors normalement à l'atmosphère. Si l'on utilise la pleine admission, le circuit électrique s'établit, le compresseur est mis en action et le clapet prévu sur le circuit normal se ferme sous l'action de la différence de pression. Le compres-

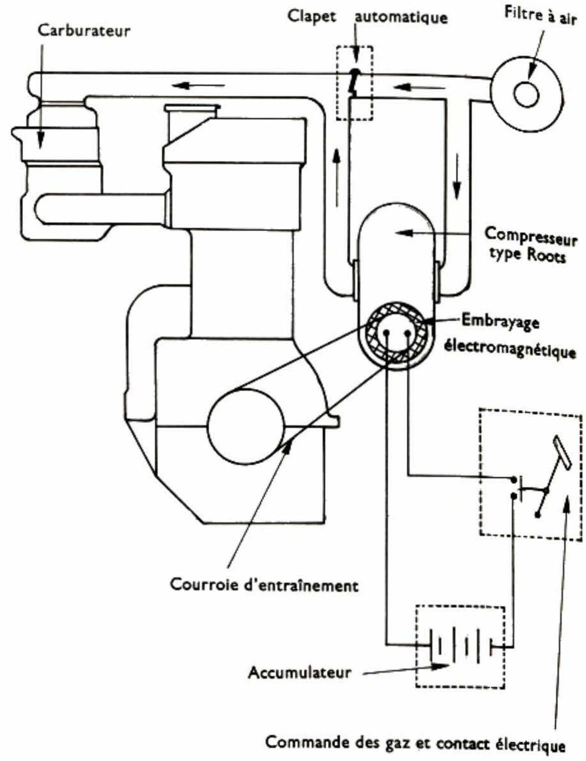


Fig. XII-5 — Schéma du système de suralimentation « M.M. »

seur est prévu pour suralimenter le moteur avec une surpression maximale de 250 à 300 mbar. Ce dispositif a été conçu surtout pour améliorer la reprise du véhicule plutôt que sa vitesse maximale.

4.1.2. Suralimentation différentielle d'un moteur Diesel (fig. XII-6). — Le but recherché par les promoteurs de ce dispositif est d'obtenir une puissance constante du moteur ce qui constitue la caractéristique idéale qu'on demande à un propulseur de véhicule automobile.

La suralimentation différentielle permet de réaliser un rapport de pression de suralimentation maximal à basse vitesse du moteur et décroissant avec l'augmentation du régime. Ce résultat est obtenu en utilisant un compresseur volumétrique entraîné par le moteur à l'aide d'une commande différentielle (du type train épicycloïdal) disposée entre le moteur et l'arbre de sortie.

Principe de fonctionnement. — Le moteur entraîne le plateau porte-satellites alors que l'arbre de sortie est commandé par le planétaire extérieur et que le planétaire intérieur commande le compresseur par l'intermédiaire d'un train d'engrenages. Remarquons que le dispositif différentiel est un système équilibreur de couple en sorte que le couple résultant sur l'arbre de sortie est égal au couple moteur divisé par un coefficient constant qui dépend du choix des diamètres des pignons. Le rapport des vitesses entre les trois éléments du train épicycloïdal est fonction des couples résistants à chaque instant. Par exemple, si le couple résistant sur l'arbre de sortie tend à augmenter, la vitesse du compresseur s'accroît ce qui entraîne une augmentation du taux de suralimentation du moteur donc de sa puissance. L'équilibre est atteint quand la somme algébrique du couple moteur, du couple d'entraînement du compresseur et du couple sur l'arbre de sortie est nulle.

4.2. Turbosuralimentation du moteur Diesel

(fig. XII-7). — Pour les raisons évoquées précédemment la turbosuralimentation est surtout appliquée au moteur Diesel et exceptionnellement à quelques moteurs de compétition (moteurs Turbo-Ford, Offenhauser pour la course d'Indianapolis) pour atteindre des puissances spécifiques d'environ 250 chevaux par litre de cylindrée ; elle n'est pas pratiquée sur les moteurs à allumage commandé de série.

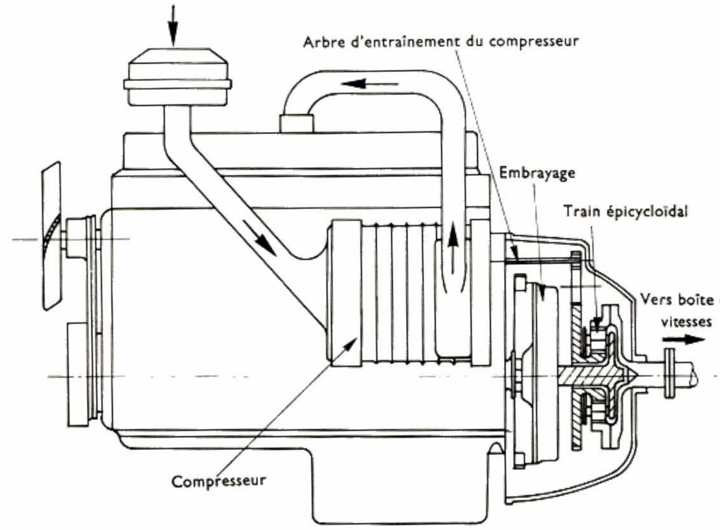


Fig. XII-6

Dispositif de suralimentation différentielle d'un moteur Diesel de traction

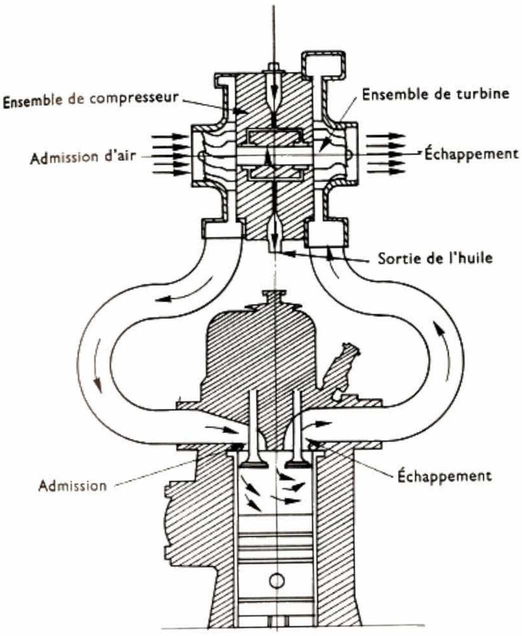


Fig. XII-7 — Principe de fonctionnement d'un turbocompresseur (C.A.V.)

4.2.1. Adaptation du turbocompresseur au moteur. — Trois procédés sont utilisés pour l'alimentation de la turbine :

— le procédé à ondes de pression ;
— le procédé à pression constante ;
— le procédé à convertisseur d'impulsions.

a) *Procédé à ondes de pression.* — L'énergie que pourrait produire la détente isentropique complète jusqu'à la pression atmosphérique des gaz contenus dans le cylindre est limitée par la course du piston. Le but recherché dans le procédé à ondes de pression (ou à bouffée d'échappement) est de récupérer la plus grande partie possible de l'énergie qui n'a pu être utilisée dans le cylindre au cours de la détente.

Ce but est atteint grâce à l'emploi de collecteurs d'échappement de faible section dans lesquels la pression atteint rapidement une valeur proche de celle régnant dans le cylindre à l'ouverture-échappement (O. E.). Les pulsations de pressions provenant des différents cylindres doivent être séparées dans le collecteur et la turbine de manière à obtenir une alternance maximale. Par exemple, pour un moteur six cylindres ayant un ordre d'allumage 1-5-3-6-2-4 il faut utiliser une turbine à deux entrées qui sera alimentée respectivement à partir des cylindres 1-2-3 et 4-5-6. Cette disposition présente un avantage supplémentaire en ce qui concerne le moteur. En effet, à la fin de la phase d'échappement la pression baisse dans le collecteur d'échappement et atteint une valeur inférieure à celle de l'air de suralimentation, ce qui permet d'assurer un balayage efficace de la chambre de combustion.

La suralimentation par ondes de pression peut être considérée comme un procédé idéal lorsqu'il est possible de raccorder trois ou quatre cylindres à un collecteur d'échappement. Dans les autres cas les inconvénients deviennent de plus en plus sensibles au fur et à mesure que la vitesse de rotation du moteur et que le rapport de pression de suralimentation augmentent.

b) *Procédé à pression constante.* — Dans cette disposition on renonce à utiliser l'énergie de bouffée d'échappement. Les gaz d'échappement de tous les cylindres sont détendus par laminage à une pression égale à celle régnant dans le collecteur et sont dirigés vers la turbine dans un conduit commun. L'énergie contenue dans les gaz d'échappement sous forme d'énergie interne est en partie transformée en énergie mécanique par la turbine.

Parmi les avantages que présente ce procédé citons :

— Récupération favorable de l'énergie pour les rapports de pressions compresseur-turbine élevés.

— Rendement élevé de la turbine grâce à l'état stable des gaz au niveau du distributeur.

— Simplicité du collecteur d'échappement pour les polycylindres.

— Sensibilité du moteur aux ondes de pression réduite et, en particulier, pas de limitation du régime de rotation en l'absence de phénomènes de résonance.

Ce procédé présente également des inconvénients :

— Inertie du turbocompresseur lorsque la charge augmente brusquement.

— Possibilités de balayage de la chambre limitées et même risque de contre-balayage à faible charge du moteur.

Pratiquement la suralimentation à pression constante n'est applicable qu'aux moteurs fortement suralimentés fonctionnant le plus souvent à forte charge et sans variation brusque ou fréquente de cette charge.

c) *Convertisseur d'impulsions.* — L'application de ce procédé est relativement récente. Il consiste essentiellement à réunir les conduites d'échappement de différents cylindres avant la turbine de façon à utiliser favorablement les ondes de pression pour le balayage de la chambre de combustion durant la phase de croisement. Considérons, par exemple, le cas des moteurs à quatre temps à 4, 8 ou même 10 cylindres ; un effet favorable est obtenu en réunissant à l'amont de la turbine deux conduites de deux cylindres, ayant un intervalle d'allumage correspondant à une rotation de 360° du vilebrequin, cela par l'intermédiaire d'un dispositif, appelé convertisseur d'impulsions. Ensuite il est

possible de relier quatre cylindres pour lesquels l'intervalle d'allumage est de 180° à un secteur de tuyères de turbine commun à injection totale car la présence du convertisseur d'impulsions évite les perturbations qui résulteraient de l'échange des gaz si l'on appliquait simplement la solution à quatre impulsions.

Les systèmes de suralimentation avec convertisseurs d'impulsions conviennent pour les moteurs à grandes vitesses de rotation à condition d'utiliser des conduites d'échappement longues avec des temps de propagation d'ondes de pression assez longs. L'emploi du convertisseur d'impulsions pour la suralimentation des moteurs deux temps s'avère également très intéressante.

4.2.2. Capacité d'adaptation aux variations des conditions de fonctionnement du moteur. — Les conditions de fonctionnement d'un moteur Diesel sont définies par sa vitesse de rotation qui détermine le débit en volume et par la quantité de combustible injectée qui nécessite une certaine valeur de la masse volumique de l'air admis. La relation entre la quantité de combustible injectée et la vitesse de rotation diffère selon l'emploi auquel le moteur est destiné. L'adaptation du turbocompresseur est d'autant mieux réussie que celui-ci assure à tout instant la demande en air du moteur, compte tenu du fait que la variation du débit massique d'air diffère suivant que la variation de puissance du moteur est obtenue par évolution du couple ou de sa vitesse de rotation.

4.2.3. Moteur à vitesse de rotation constante. — Si la température d'admission et le taux de remplissage du moteur sont supposés constants, le débit massique d'air est proportionnel à la pression de suralimentation; le lieu décrit par les points d'adaptation est une droite dont la pente est plus forte que la pente moyenne de la ligne de pompage (fig. XII-8).

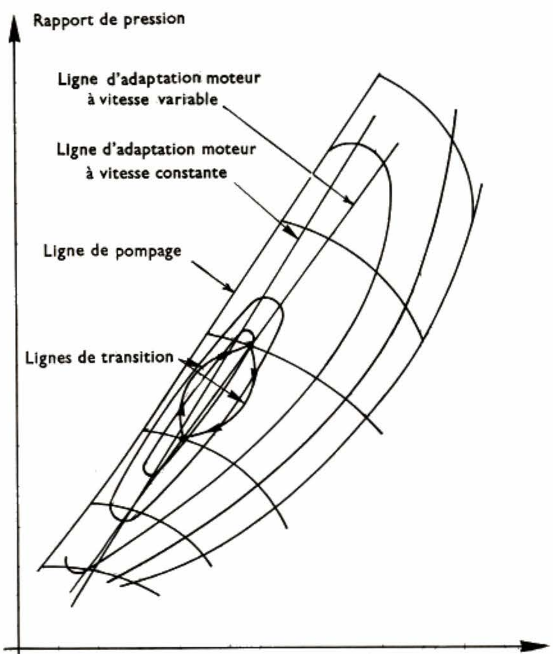


Fig. XII-8 — Adaptation du turbocompresseur au moteur

Ce cas de fonctionnement ne se rencontre pratiquement pas sur les moteurs Diesel de traction mais il peut représenter un cas particulier de l'ensemble du réseau des isovitesses du moteur.

4.2.4. Moteur de traction routière à transmission mécanique. — Nous avons noté précédemment, à propos de la suralimentation différentielle, l'intérêt d'obtenir dans ce cas une courbe de couple décroissante en fonction de l'augmentation de régime du moteur. Cette condition nécessite que les points d'adaptation se situent sur une ligne de forme parabolique se rapprochant de la courbe de pompage à basse vitesse, mais cela n'est généralement pas suffisant. On a donc actuellement recours à deux procédés pour améliorer les performances.

Le premier consiste à adapter le turbocompresseur pour une vitesse de rotation réduite du moteur. Au régime maximal du moteur le turbocompresseur doit pouvoir supporter une survitesse qui peut d'ailleurs être limitée par un abaissement voulu de son rendement global.

Le second procédé consiste également à adapter le turbocompresseur à basse vitesse mais à disposer en plus un clapet de décharge, dont le fonctionnement est asservi à la pression du moteur, en amont de la turbine. De cette façon l'énergie fournie à la turbine peut être limitée et le turbocompresseur est protégé contre les survitesses (fig. XII-9). En réalité, la vitesse de rotation du turbocompresseur ne suit pas instantanément les variations de charge du

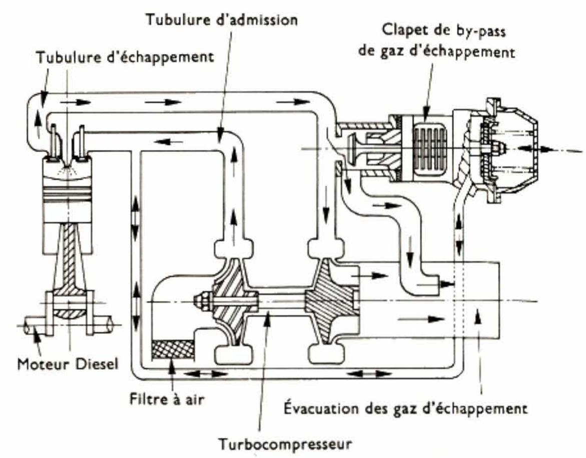


Fig. XII-9 — Schéma du dispositif de contrôle de turbosuralimentation d'un moteur Diesel

moteur en fonctionnement transitoire. Pour chaque nouvelle condition d'adaptation, il faut en effet fournir ou absorber l'énergie correspondant à l'accélération ou à la décélération des masses tournantes jusqu'à l'obtention d'une nouvelle vitesse définie par l'état d'équilibre des travaux turbine et compresseur. Il en résulte que, sur le diagramme des caractéristiques (V. fig. XII-8), les lignes de transition décrivent une boucle dont les points se rapprochent de la ligne de pompage dans le cas de l'accélération.

Par ailleurs, la perte de charge provoquée par le compresseur entraîne un manque d'air à l'admission du moteur qui peut alors avoir tendance à fumer. Pour éviter ces inconvénients il faut:

1° Augmenter progressivement la quantité de combustible injectée ou asservir sa valeur à la pression fournie par le compresseur.

2° Recourir à l'emploi de turbocompresseurs de faible inertie ce qui conduit certains constructeurs à équiper leur moteur de deux petits turbocompresseurs plutôt que d'un seul de plus grande inertie.

4.3. Suralimentation à rapport de pressions élevé. À condition de limiter le rapport de pressions à une valeur d'environ 1,5, il est généralement possible de suralimenter un moteur Diesel sans autres modifications que le montage d'un turbocompresseur (avec éventuellement le changement de l'arbre à cames) et le réglage du système d'injection. Ce procédé permet d'obtenir une augmentation substantielle de puissance de façon relativement facile. En revanche, pour un rapport de pression voisin de 3, l'application de la très forte suralimentation qui peut permettre de doubler la puissance spécifique nécessite que le moteur soit spécialement conçu pour supporter les charges d'origine thermique et mécanique résultant de cette application.

La température de l'air au refoulement du compresseur croît avec l'augmentation du rapport de pression. Cela entraîne en ce qui concerne le moteur et la turbine :

— Une réduction relative de la quantité de combustible injectée par cycle du fait que la masse volumique de l'air admis diminue quand sa température augmente.

— Un accroissement des températures maximales de cycle donc des contraintes d'origine thermique plus sévères.

— Un niveau de température à l'entrée de la turbine plus élevé à débit d'air de balayage égal et donc des températures d'aubages plus fortes.

Pour limiter ces effets on dispose un refroidisseur d'air entre le refoulement du compresseur et l'admission du moteur de manière à maintenir la température d'admission à une valeur acceptable.

En fait un rapport de pression de 3 ne constitue pas une limite à la suralimentation des moteurs Diesel bien que cette valeur soit proche du rapport maximal susceptible d'être atteint sur un compresseur centrifuge à un seul étage. Il faut cependant noter que de telles valeurs de suralimentation conduisent à des pressions maximales de cycle de plus en plus élevées et devenant inacceptables en raison du bruit émis par le moteur. Pour remédier à cet inconvénient certains constructeurs limitent volontairement les pressions maximales en réduisant le rapport volumétrique de compression à la valeur minimale compatible avec les conditions de démarrage à froid. D'autres sont allés plus loin encore en utilisant un piston dont la longueur au-dessus de l'axe varie en fonction des pressions maximales (par exemple, piston Biceri) ou en imaginant une chambre de combustion dont le volume est fonction de la pression de suralimentation (par exemple, chambre de turbulence à volume variable Hispano).

On a pu ainsi obtenir de moteurs Diesel à quatre temps fortement suralimentés une pression moyenne effective de 26 bars pour une puissance spécifique de 80 ch/l à 2 800 tr/mn et 12 m/s de vitesse moyenne du piston.

CHAPITRE XIII

INSONORISATION DU MOTEUR

Le rayonnement acoustique d'un moteur a pour sources principales :

— les orifices d'admission et d'échappement ;
— les vibrations structurales.

L'atténuation du bruit d'admission et d'échappement est rendue possible par l'utilisation de silencieux dont nous examinerons par la suite différentes dispositions. Cependant, une des difficultés de l'insonorisation de l'admission et de l'échappement réside dans le fait que la présence du ou des silencieux modifie la forme de l'onde sonore à la source.

Les vibrations structurales du moteur engendrent un rayonnement direct et un rayonnement indirect par les organes qui lui sont liés. Par exemple, un moteur fixé rigidement à une structure quelconque lui communique ses vibrations qui peuvent se propager à une certaine distance et être perçues au contact, ou rayonnées dans l'air par les éléments légers de l'ensemble. Les vibrations structurales mettent en cause le cycle et le dessin du moteur et il s'avère actuellement nécessaire d'apporter des solutions nouvelles au stade de la conception si l'on veut faire des progrès substantiels, principalement en ce qui concerne le cas des moteurs Diesel.

Le moteur constitue en fait un ensemble de sources sonores dont l'intensité globale en un point déterminé est égale à la somme des intensités individuelles. Or, d'après la loi d'addition des niveaux sonores exprimés en décibels, lorsque dans un groupe de deux sources sonores de même puissance on en supprime une, la réduction de niveau sonore n'est que de 3 dB. Il en résulte qu'une atténuation même importante d'une des composantes ne peut entraîner qu'un abaissement faible du niveau global si les différentes sources sont à un niveau voisin.

1. RÉDUCTION DU RAYONNEMENT DU BRUIT ÉMIS PAR LES ORIFICES D'ADMISSION ET D'ÉCHAPPEMENT

On réduit ce bruit en utilisant un ou plusieurs silencieux disposés sur les canalisations. Il existe essentiellement deux types de silencieux :

— Les silencieux à absorption dans lesquels on utilise les propriétés absorbantes d'un matériau adapté.

— Les silencieux à résonateur où l'on a recours à des cavités convenablement dimensionnées et qui atténuent le bruit par réflexion.

1.1. Silencieux à absorption (fig. XIII-1). — Le silencieux à absorption est un filtre passe-bas dans lequel les fréquences élevées sont surtout atténuées. L'atténuation Δ exprimée en décibels peut se calculer à l'aide de la formule approximative suivante :

$$\Delta = 1{,}5\, a \frac{P}{\Sigma}\, l$$

dans laquelle nous appelons :

a : le coefficient d'absorption du son à la fréquence considérée ;
P : le périmètre de la section transversale du silencieux ;
Σ : l'aire de sa section transversale ;
l : la longueur du silencieux.

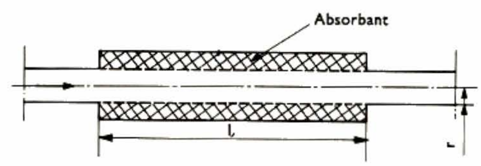


Fig. XIII-1

Schéma de silencieux à absorption

L'efficacité varie ainsi en raison inverse des dimensions transversales du silencieux.

Le silencieux d'échappement du type « Burgess » est basé sur ce principe. Il est essentiellement constitué d'un tuyau perforé de section circulaire, au travers duquel passe les gaz d'échappement, entouré d'un manchon d'absorbant. Si *r* est le rayon du tuyau perforé et *l* sa longueur, la formule précédente donne : $\Delta = 3\, a \frac{l}{r}$. Le coefficient d'absorption *a* est généralement très faible aux basses fréquences mais il augmente avec l'épaisseur de la couche d'absorbant ; il peut atteindre 0,8 pour certaines fréquences.

1.2. Silencieux à résonateurs. — Si l'on exerce une résistance acoustique en un ou plusieurs points déterminés d'une tuyauterie, en y disposant des résonateurs en série ou en dérivation, le son qui s'y propage est partiellement réfléchi et l'amplitude de l'onde transmise est diminuée.

Davis, Stokes, Moore et Stevens du N.A.C.A. ont étudié d'une façon systématique les atténuations théoriques et pratiques susceptibles d'être obtenues avec de tels dispositifs. Nous limiterons la présente étude à l'exposé des principaux résultats.

1.2.1. Chambre d'expansion en série (fig. XIII-2). — Le calcul de l'atténuation qui résulte de la présence de la chambre, en l'absence de réflexion d'onde dans la partie

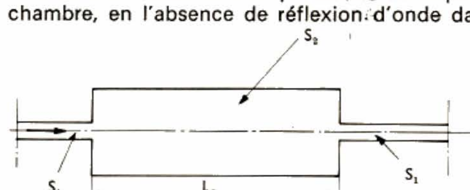


Fig. XIII-2

Chambre d'expansion : S_1 et S_2 : sections transversales

aval de la conduite (ce qui revient à supposer sa longueur infinie), donne le résultat suivant :

$$\Delta \text{ (décibels)} = 10 \log_{10} \left[1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl_e \right]$$

avec :

$$m = \frac{S_2}{S_1} \quad \text{et} \quad k = \frac{2\pi f}{c}$$

f est la fréquence de l'onde incidente et c la vitesse de propagation du son dans le milieu considéré.

La relation précédente montre que l'atténuation augmente avec le rapport m et que la courbe d'atténuation est cyclique. L'atténuation maximale est obtenue pour $\sin^2 kl_e = 1$ c'est-à-dire pour $kl_e = n \frac{\pi}{2}$; elle est égale à :

$$\Delta_M \text{ (décibels)} = 10 \log_{10} \left[1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \right]$$

Elle est indépendante de la longueur de la chambre d'expansion.

Si la chambre d'expansion est prolongée par une conduite de longueur finie l_t, il existe une fréquence limite inférieure au-delà de laquelle l'atténuation est très faible. La valeur approximative de cette fréquence (appelée fréquence de coupure) est donnée par la formule suivante :

$$f_c = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{4 + \dfrac{2\, l_e}{m\, l_t}}{\left(m + \dfrac{1}{m} \right) l_e\, l_t}}$$

La figure XIII-3 donne les courbes représentatives de l'atténuation en fonction de l'arc kl_e pour différentes valeurs du rapport d'expansion m.

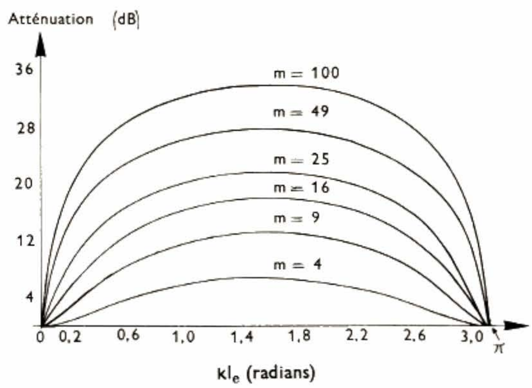


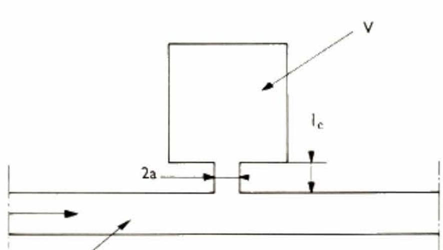
Fig. XIII-3 — Courbes d'atténuation d'une chambre d'expansion en série (*N.A.C.A.*)

Les auteurs précités ont étudié également des dispositifs à double chambre d'expansion reliées par une conduite externe ou interne.

1.2.2. Chambre en dérivation (fig. XIII-4). — La chambre placée en dérivation sur la conduite de section S constitue en fait un résonateur de Helmholtz dont la fréquence naturelle a pour valeur :

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{c_0}{V}}$$

Fig. XIII-4



c_0 : conductivité acoustique du col de rayon a et de longueur :

$$l_c = \frac{\pi a^2}{l_c + \beta a} \qquad \left(\beta = \frac{\pi}{2} \right)$$

En l'absence d'onde stationnaire dans la partie aval de la conduite (conduite infinie) et en négligeant l'effet de la viscosité du gaz au col du résonateur (ce qui se justifie excepté à la résonance) l'atténuation a pour valeur :

$$\Delta \text{ (décibels)} = 10 \log_{10} \left[1 + \left\{ \frac{\dfrac{\sqrt{c_0 V}}{2\, S}}{\dfrac{f}{f_0} - \dfrac{f_0}{f}} \right\}^2 \right]$$

Cette relation montre qu'en négligeant l'effet de la viscosité, l'atténuation est infinie lorsque la fréquence d'excitation f est égale à f_0, ce qui signifie que l'amplitude de l'onde transmise est nulle. En pratique, un résonateur peut produire une atténuation de 30 à 50 dB et constitue donc un moyen très efficace pour éliminer une fréquence gênante. Sous cette forme il reste malgré tout très sélectif et son efficacité se limite essentiellement à la fréquence de résonance.

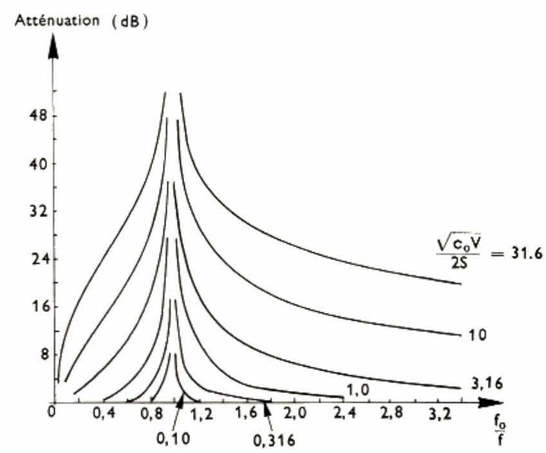


Fig. XIII-5 — Courbes d'atténuation d'une chambre en dérivation (*N.A.C.A.*)

La figure XIII-5 montre les courbes d'atténuation d'un résonateur. Si la longueur de la conduite aval est limitée à une valeur l_t il existe également une fréquence approximative de coupure donnée par la relation :

$$f_c = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \dfrac{c_0\, l_t}{2\, S}}}$$

Si l'on utilise M chambres identiques disposées comme indiqué sur la figure XIII-6 l'atténuation a pour expression :

Δ (décibels) =

$$- 8{,}69 \,.\, M \,.\, \text{ch}^{-1} \left\{ \cos \frac{2\pi f_0}{c} \,.\, l_1 + \frac{\dfrac{\sqrt{c_0 V}}{2\, S}}{\dfrac{f}{f_0} - \dfrac{f_0}{f}} \sin \frac{2\pi f_0}{c} l_1 \right\}$$

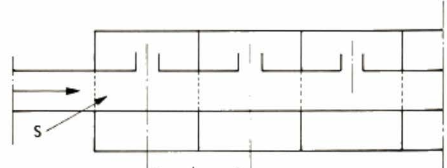
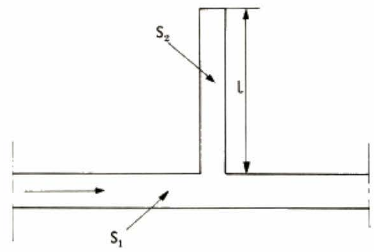


Fig. XIII-6

1.2.3. Résonateur à colonne quart d'onde en dérivation (fig. XIII-7). — Cette disposition consiste à brancher un tuyau fermé à une extrémité sur la conduite à insonoriser.

Fig. XIII-7

Résonateur à colonne quart d'onde



La fréquence fondamentale de ce résonateur est :

$$f_0 = \frac{c}{4\,l}$$

En négligeant la correction de bout à l'extrémité libre du résonateur et en supposant la conduite infinie, d'après J. Rauch l'atténuation est égale à :

$$\Delta\,(\text{décibels}) = 10 \log_{10}\left[1 + \frac{1}{4}\left(\frac{m}{\frac{\pi}{2}\cdot\frac{f}{f_0} - \text{cotg}\,\frac{\pi}{2}\,\frac{f}{f_0}}\right)^2\right]$$

$$m = \frac{S_2}{S_1}$$

f : fréquence d'excitation.

L'avantage du résonateur à colonne réside dans le fait que, contrairement au résonateur à volume, l'atténuation est une fonction périodique de la fréquence. Il se rapproche, à ce point de vue, de la chambre d'expansion en série.

2. INSONORISATION DE L'ADMISSION

Le bruit rayonné par le système d'admission peut être attribué aux causes suivantes :

a) *Excitation des conduites d'admission* constituant le collecteur, par les mouvements du piston et de la soupape pendant la phase d'admission (du point de vue acoustique le collecteur d'admission constitue un résonateur à fréquences multiples, à vibrations auto-entretenues, et de ce fait est le siège d'ondes stationnaires).

b) *Turbulences de l'écoulement des gaz,* essentiellement autour des soupapes. Par exemple, l'examen du spectre de l'onde sonore d'admission d'un moteur quatre cylindres à quatre temps, de 1 500 cm³ de cylindrée, détectée à l'aide d'un microphone placé dans l'axe du carburateur à une distance de 10 cm, met en évidence deux zones de fréquences nettement séparées (fig. XIII-8). L'une comprise entre 20 et 1 000 Hz est composée d'un spectre de raies d'amplitudes élevées correspondant à la pulsation fondamentale d'admission du moteur et à ses harmoniques ; l'autre à compter de 1 000 Hz se présente sous la forme d'un spectre continu caractéristique de la turbulence de l'écoulement. L'examen des diagrammes de la figure précédente montre encore que les amplitudes maximales sont obtenues sur la fréquence fondamentale et les harmoniques 2 et 3. En effet, la fréquence fondamentale d'un moteur à quatre cylindres étant égale à $\frac{N}{30}$, nous avons donc dans le cas présent :

$N = 2\,500$ tr/mn : $f_0 = 83$ Hz ; $H_2 = 167$ Hz ; $H_3 = 250$ Hz ;
$N = 5\,000$ tr/mn : $f_0 = 167$ Hz ; $H_2 = 334$ Hz ; $H_3 = 500$ Hz.

Pour ces fréquences caractéristiques, l'amplitude de l'onde est d'autant plus grande que le rang de l'harmonique considéré correspond à la fréquence propre fondamentale du collecteur ou à une de ses partiels, c'est-à-dire s'il y a résonance. Il faut également remarquer que l'intensité globale atteint 126 dB (A) à 2 500 tr/mn et 135 dB (A) à 5 000 tr/mn ce qui correspond à un accroissement moyen de 9 dB quand la vitesse de rotation du moteur est doublée.

Le but de l'insonorisation consiste à réduire à une valeur acceptable l'amplitude de l'onde sonore que rayonne l'extrémité ouverte à l'atmosphère du dispositif d'admission, tout en assurant les performances maximales du moteur quelles que soient ses conditions d'utilisation. Le silencieux choisi doit pouvoir supporter les vibrations mécaniques transmises par le moteur ainsi que les échauffements ; il peut comprendre en outre le filtre à air.

Les silencieux utilisés (V. fig. XIII-9) en vue de l'insonorisation de l'admission sont du type à chambre d'expansion en série, particulièrement sur les moteurs des voitures de tourisme. Ils sont du type à résonateur sur les véhicules utilitaires en raison de leur poids et de leur encombrement. Ce sont aussi les plus efficaces pour éliminer les fréquences indésirables.

Les silencieux du type à chambre d'expansion comportent en général le filtre à air ; ils sont constitués d'éléments en tôle d'acier emboutie et assemblés par sertissage et soudure. La longueur du tuyau d'admission dépend du volume de la chambre ; elle est calculée et vérifiée expérimentalement pour chaque application. Les ondes stationnaires susceptibles de s'établir dans ce tuyau, en raison de la réflexion à

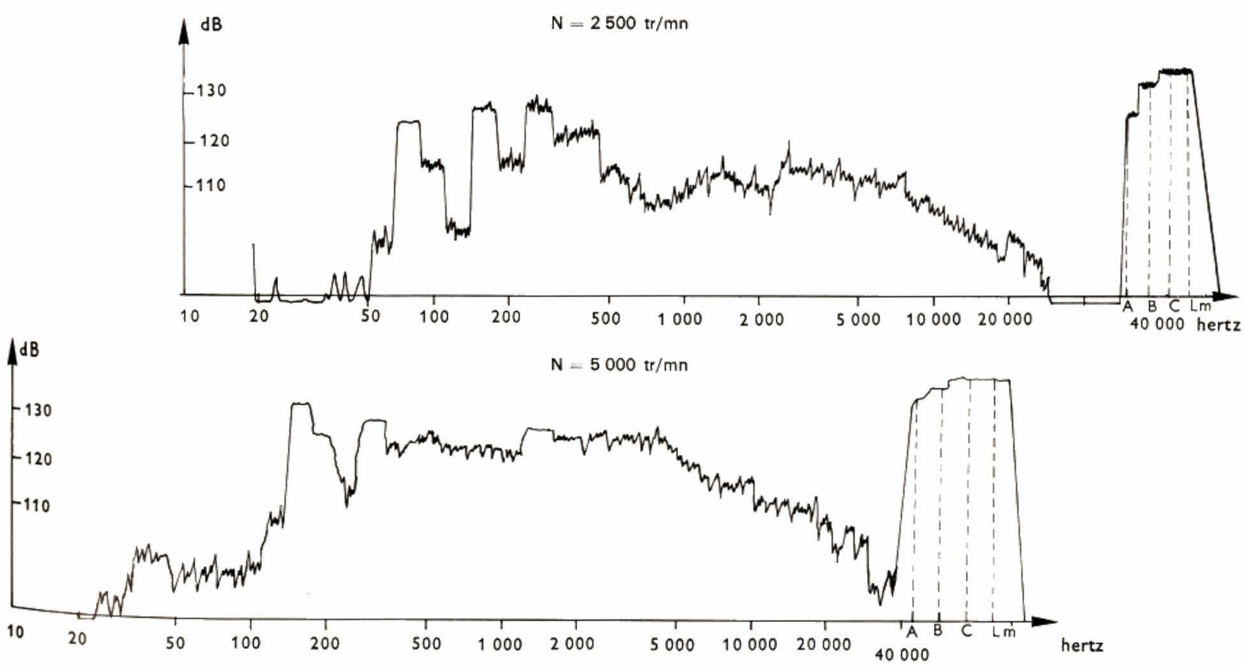


Fig. XIII-8 — Spectres de l'onde sonore d'admission

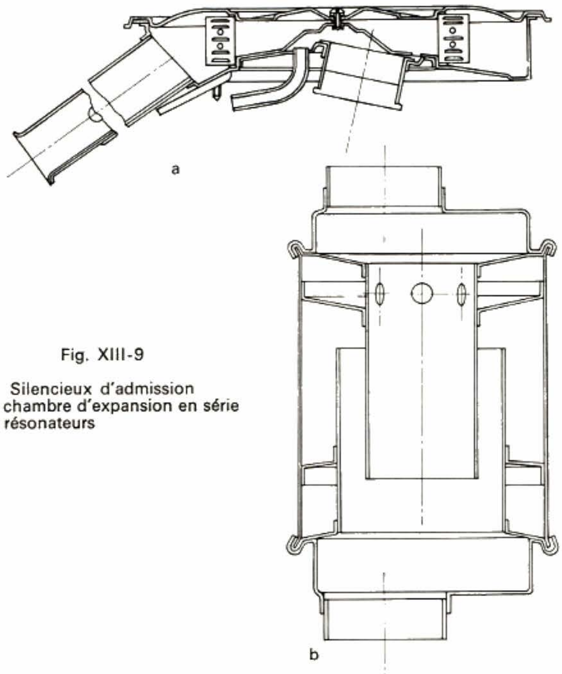


Fig. XIII-9

Silencieux d'admission
a : à chambre d'expansion en série
b : à résonateurs

l'atmosphère d'ondes incidentes résiduelles, peuvent être réduites ou même supprimées au moyen de trous percés dans les zones appropriées. La rigidité des emboutis constituant le silencieux est importante, surtout pour le couvercle supérieur car les pulsations de l'air à l'intérieur de la chambre peuvent le faire vibrer.

On utilise également des moulages de polypropylène pour la réalisation de certains silencieux. Il en résulte des avantages dus aux caractéristiques d'amortissement de ce matériau. Il est également possible d'utiliser des plastiques renforcés par de la fibre de verre pour la réalisation de modèles fabriqués en petite série.

L'adaptation du silencieux sur un moteur déterminé est un problème délicat à traiter car sa présence modifie la valeur instantanée de la pression (amplitude et phase) au niveau de la soupape. Il en résulte généralement deux effets sur le fonctionnement du moteur :

— évolution dans un sens favorable ou défavorable du taux de remplissage ;

— modification du rapport air-combustible en raison essentiellement des variations des conditions de pression au niveau libre de la cuve et aux gicleurs du carburateur.

C'est en grande partie pour ces raisons que les moteurs qui ne comportent qu'un faible nombre de cylindres (deux ou quatre) sont les plus difficiles à insonoriser et le problème se trouve aggravé si chaque cylindre est alimenté par un carburateur séparé.

La réduction du débit d'air par perte de charge dans l'élément filtrant est généralement négligeable. Avec un silencieux bien accordé on peut admettre, du point de vue remplissage, une perte de charge équivalente à une pression de 250 à 500 mm d'eau au débit d'air maximal du moteur. L'élément filtrant peut avoir une influence favorable sur la carburation en assurant un débit d'air plus régulier au niveau du carburateur.

En plus de l'analyse du spectre de bruits relevés à l'aide de moyens de mesures perfectionnés, les travaux d'adaptation d'un silencieux sur un moteur de véhicule automobile sont complétés par l'application de techniques d'évaluation subjective des bruits. Le succès de cette méthode d'estimation montre que l'oreille humaine permet de distinguer les bruits selon leurs sources et d'en déceler les éléments les plus gênants.

3. INSONORISATION DE L'ÉCHAPPEMENT

L'onde sonore émise par l'échappement a essentiellement pour origine :

a) La bouffée d'échappement durant une partie de laquelle l'écoulement des gaz au niveau de la soupape se fait à grande vitesse (500 m/s).

b) Le refoulement des gaz brûlés par le piston.

c) L'excitation des conduites du collecteur d'échappement par l'onde de pression qui résulte de la bouffée, du mouvement du piston et de la soupape d'échappement.

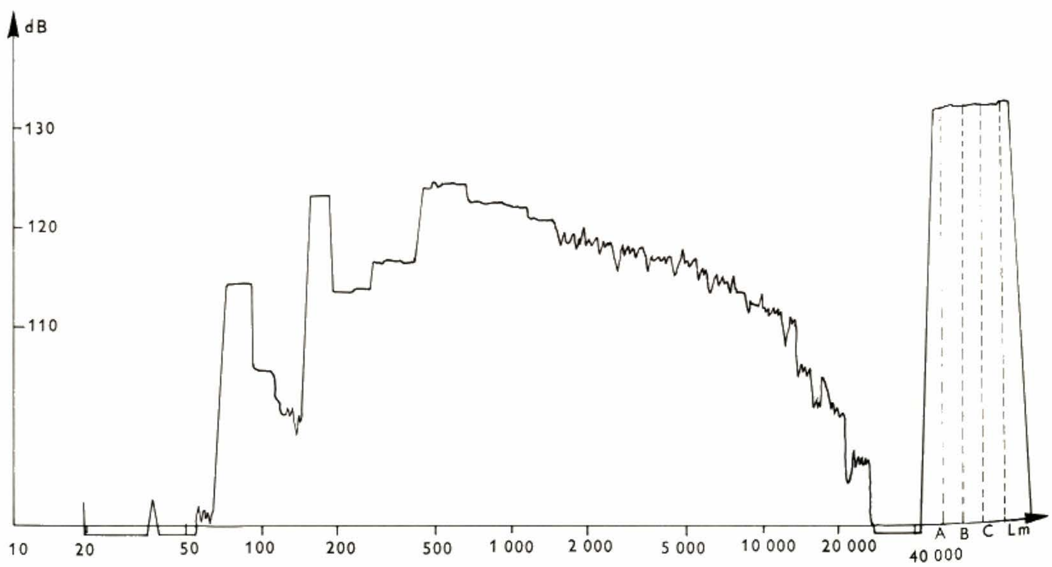
Les avis sont partagés sur l'importance relative du bruit produit par les turbulences de l'écoulement des gaz et du bruit fondamental, notamment en ce qui concerne les problèmes posés par l'insonorisation de l'échappement.

En fait, le spectre du bruit d'échappement (fig. XIII-10 a et b) d'un moteur à quatre temps à allumage commandé, à quatre cylindres, 1 500 cm³ de cylindrée, mesuré à la bouche d'un conduit cylindrique relié au moteur par l'intermédiaire d'un collecteur du type 3 Y, révèle encore les deux zones de fréquences caractéristiques, déjà observées à propos de l'admission :

— un spectre composé de raies dans la gamme de fréquences de 20 à 1 000 Hz et dans lequel domine la fréquence fondamentale du moteur, ses harmoniques 2-3-4 ainsi que la demi-fréquence fondamentale, ce qui est caractéristique de l'échappement ;

— un spectre de bandes dans l'intervalle 1 000 à 20 000 Hz caractéristique de la turbulence de l'écoulement.

Fig. XIII-10 a



Spectre de l'onde sonore d'échappement (N = 2 500 tr/mn)

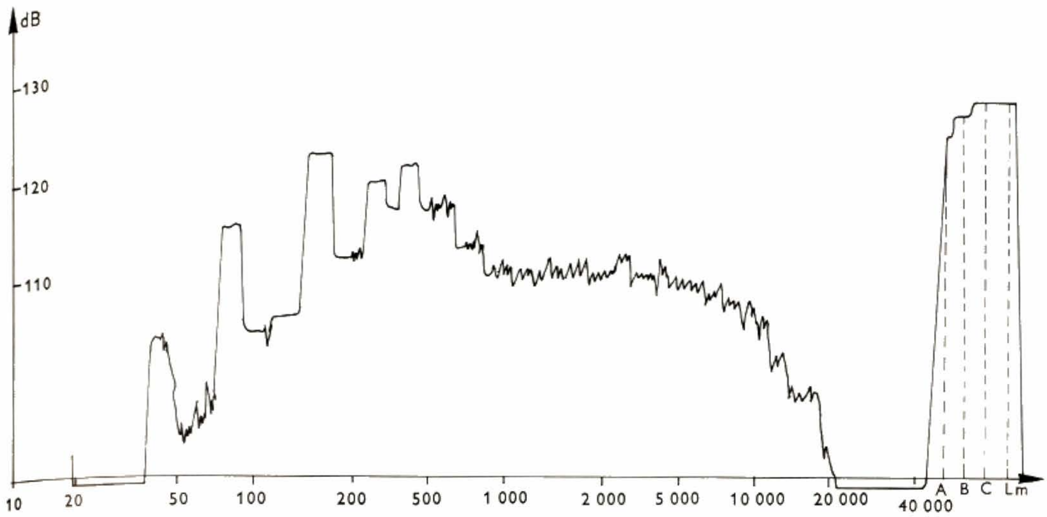


Fig. XIII-10 b

Spectre de l'onde sonore d'échappement (N = 5 000 tr/mn)

Dans le cas cité, l'accroissement de niveau global est de 7 dB (A) quand la vitesse de rotation du moteur double.

Pour déterminer un silencieux accordé il faut tenir compte de la vitesse du son dans le milieu considéré, c'est-à-dire en l'occurrence de la température absolue des gaz d'échappement (il n'en est pas de même pour un silencieux à absorption).

L'une des difficultés pour résoudre le problème de l'insonorisation réside justement dans le fait que la température moyenne subit de fortes variations en fonction de la charge et du régime du moteur. De plus, elle n'est pas la même d'un point à l'autre du trajet suivi par les gaz. Par ailleurs, l'insonorisation d'un moteur destiné à un véhicule automobile est généralement limitée par l'encombrement disponible pour loger le système d'échappement. Pour ces raisons la méthode employée comporte bien souvent une part théorique et une grande part d'empirisme. La forme et la disposition du collecteur d'échappement jouent un rôle appréciable sur la formation du bruit; l'expérience montre que les tubulures de liaison des différents cylindres doivent avoir autant que possible une longueur égale et être disposées de façon symétrique par rapport à l'orifice de raccordement avec la conduite. Si ces conditions ne sont pas respectées, un bruit haché (crépitements) peut se manifester et dans ce cas il sera nécessaire de prévoir un résonateur à proximité du collecteur (distance inférieure à 1 m). Il faut aussi noter que le bruit créé par les turbulences d'écoulement ne peut pas être réduit par l'emploi de silencieux à réflexion et qu'il est nécessaire dans ce cas d'utiliser un silencieux à absorption dont l'action sur les fréquences élevées est efficace (V. § 1.1). Si l'usage d'un silencieux à absorption s'impose celui-ci sera placé de préférence à l'aval du silencieux principal ou à l'extrémité du système d'échappement.

La réduction du niveau de bruit dû aux pulsations de l'échappement s'obtient en disposant une chambre d'expansion en série; son volume utile doit être compris entre 5 et 6 dm³ par litre de cylindrée du moteur. Une telle capacité est susceptible de réduire le niveau global du bruit mais il subsiste généralement des résonances notamment dans la bande de fréquences de 100 à 200 Hz. Pour remédier à cet inconvénient il est possible de diviser le silencieux principal en plusieurs chambres placées également en série et accordées pour réduire le niveau sonore dans une bande étroite de fréquences. On peut également disposer à l'intérieur du silencieux une chambre en dérivation (résonateur de Helmholtz) dans le but d'éliminer une fréquence gênante. La conduite d'entrée des gaz dans le silencieux peut être munie de persiennes dont la présence amortit la réflexion des vibrations vers le moteur. Ces dispositions se retrouvent dans l'exemple du silencieux d'échappement présenté sur la figure XIII-11. Le système d'échappement d'un moteur équipant un véhicule automobile ne doit pas réduire la puissance maximale de ce moteur de plus de 5 %, ce qui est possible avec un silencieux bien étudié, compte tenu des normes relatives au rayonnement du bruit à l'extrémité du conduit terminal.

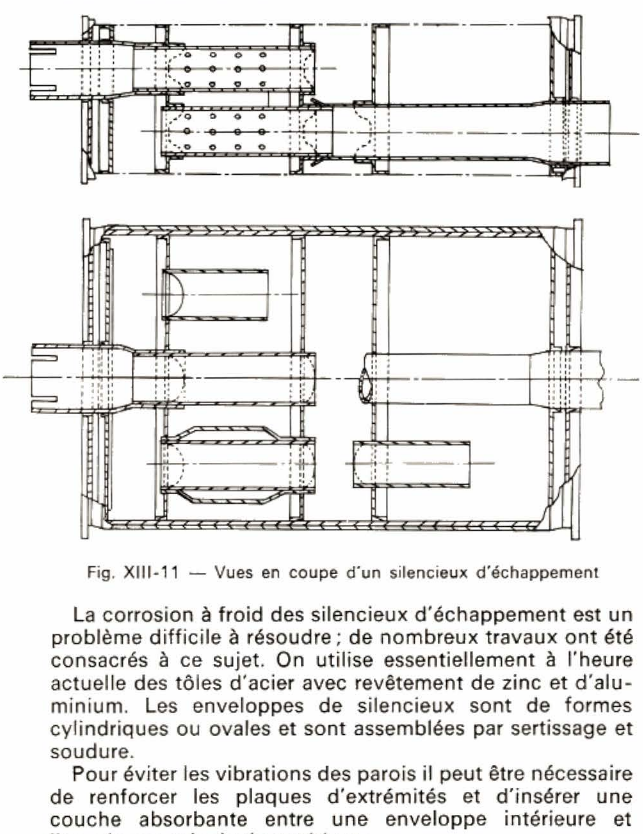


Fig. XIII-11 — Vues en coupe d'un silencieux d'échappement

La corrosion à froid des silencieux d'échappement est un problème difficile à résoudre; de nombreux travaux ont été consacrés à ce sujet. On utilise essentiellement à l'heure actuelle des tôles d'acier avec revêtement de zinc et d'aluminium. Les enveloppes de silencieux sont de formes cylindriques ou ovales et sont assemblées par sertissage et soudure.

Pour éviter les vibrations des parois il peut être nécessaire de renforcer les plaques d'extrémités et d'insérer une couche absorbante entre une enveloppe intérieure et l'enveloppe principale extérieure.

Les vibrations de la conduite d'échappement ne doivent pas être transmises à la carrosserie du véhicule. Des supports souples seront disposés en conséquence aux endroits d'amplitudes de mouvement les plus faibles.

4. VIBRATIONS STRUCTURALES DU MOTEUR

Le niveau sonore engendré par les vibrations de la structure d'un gros moteur Diesel peut atteindre 100 à 110 dB. L'intensité de ce bruit augmente comme le cube de la

vitesse de rotation et comme la puissance 1,75 de la cylindrée ; elle dépend peu de la puissance moyenne effective. Il en résulte que l'accroissement continuel des puissances spécifiques, par l'augmentation de la vitesse de rotation des moteurs, n'a fait qu'aggraver la situation, et le niveau de bruit des moteurs Diesel a augmenté de 10 dB (A) de 1950 à 1970.

La principale source de bruit des moteurs en ligne est constituée par les parois du carter de vilebrequin dont l'action sur le spectre sonore est importante aussi bien aux basses fréquences qu'aux fréquences élevées. Il semble que l'emploi de chemises sèches et l'utilisation d'un palier par cylindre tendent à donner, de ce point de vue, de meilleurs résultats que les autres dispositions. Par ailleurs, un carter qui se prolonge au-dessous de l'axe du vilebrequin tend à émettre plus de bruit dans les hautes fréquences qu'un bloc dont les parois s'arrêtent au niveau de l'axe.

Dans les moteurs en V, le bruit est principalement dû aux vibrations des deux rangées de cylindres. Il semble que la distance comprise entre l'axe du vilebrequin et la face supérieure des cylindres soit une grandeur caractéristique en ce qui concerne la fréquence propre des vibrations d'une rangée de cylindres par rapport à l'autre.

Les carters qui ne participent pratiquement pas à la rigidité du bloc moteur (carter de distribution, couvre-culbuteur, carter d'huile) provoquent une augmentation du niveau sonore à la plupart des fréquences. Les carters en alliage léger, venus de fonderie, donnent des pointes de vibrations comprises entre 1 000 et 4 000 Hz alors que ces pointes se situent entre 300 et 400 Hz avec l'emploi de carters en tôle d'acier emboutie. On a pu réduire de 9 dB le niveau global de bruit d'un moteur en insonorisant les carters à l'aide d'une feuille de plomb de 1,6 mm d'épaisseur garnie d'une couche de fibre de verre de 25 mm d'épaisseur. Une solution plus pratique consiste à réaliser des carters en deux pièces avec interposition d'un joint en caoutchouc entre les deux parties ; des essais ont montré qu'il était ainsi possible d'obtenir des améliorations considérables à condition de situer le plan de joint au bon endroit.

CHAPITRE XIV

DÉPOLLUTION DU MOTEUR

1. SOURCES DE POLLUTION

Les sources de pollution se répartissent en trois classes :

— Émissions de vapeurs de carburant au niveau du carburateur .... 10 %
— Gaz de carter (blow-by) .... 20 %
— Gaz d'échappement .... 70 %

Des solutions judicieuses permettent d'éliminer presque complètement les vapeurs de carburant et les gaz du carter. Les émissions de vapeurs de carburant doivent être traitées au niveau du carburateur ; elles ne concernent pas directement le moteur.

1.1. Gaz de carter. — L'étanchéité entre piston et cylindre ne peut être rendue totale malgré les segments. Il en résulte qu'au cours des phases compression-combustion-détente une partie du mélange carburé et des gaz de combustion fuit entre la chemise et le piston jusque dans le carter et s'échappe ensuite dans l'atmosphère avec les vapeurs d'huile. La quantité de combustible imbrûlé contenue dans les gaz de carter n'est pas négligeable puisqu'elle arrive à représenter jusqu'à 25 % du total émis par un véhicule.

1.2. Gaz d'échappement

1.2.1. Principaux composants des gaz de combustion. Processus de formation. — La réaction théorique d'un hydrocarbure avec l'oxygène correspond à l'équation chimique suivante :

$$C_xH_y + \left(x + \frac{y}{4}\right) O_2 \rightarrow x\,CO_2 + \frac{y}{2} H_2O$$

La combustion complète et idéale donne donc comme produits de combustion : du gaz carbonique et de la vapeur d'eau, c'est-à-dire deux produits non polluants.

Les conditions réelles de la combustion s'éloignent considérablement de l'image qui vient d'être donnée car il faut tenir compte :

— de la composition du combustible notamment de la présence d'azote, de soufre, etc., et des additifs qui se retrouvent intégralement dans les produits de combustion ;
— des réactions de l'azote de l'air avec l'oxygène ;
— des conditions de la combustion qui ne sont jamais optimales.

Ces raisons font que l'on trouve dans les gaz d'échappement, en quantité plus ou moins grande selon les cas :

— du monoxyde de carbone CO ;
— des hydrocarbures imbrûlés C_xH_y ;
— des oxydes d'azote NO_x ;
— des produits d'oxydation partielle (esters, aldéhydes, etc.) ;
— des particules diverses (tétraéthyle de plomb).

Les courbes de la figure XIV-1 montrent que les teneurs en monoxyde de carbone et en hydrocarbures sont minimales pour les richesses inférieures à 1 alors que la teneur en oxydes d'azote passe par un maximum pour une richesse comprise entre 0,9 et 1. Ce résultat met d'ailleurs en évidence les difficultés que présente la réduction simultanée des teneurs en raison de l'impossibilité de faire fonctionner correctement un moteur pour des richesses inférieures à 0,8, seules valeurs qui soient entièrement favorables.

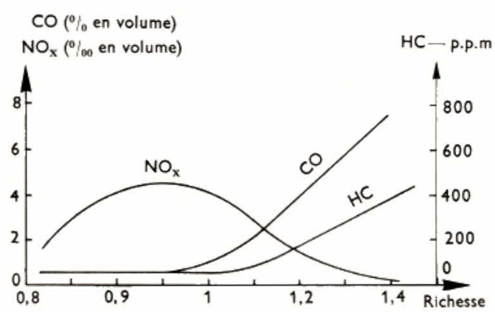


Fig. XIV-1 — Évolution des teneurs en oxydes d'azote NO_x, monoxyde de carbone CO et hydrocarbures H.C. des gaz d'échappement d'un moteur à allumage commandé en fonction de la richesse à pleine charge

1.2.2. Hydrocarbures imbrûlés. — Les résultats des travaux effectués dans les laboratoires de la General Motors vers 1955 ont montré que la surface des parois de la chambre de combustion est une des causes principales de non combustion d'hydrocarbures. En effet, on a constaté qu'au voisinage des parois il existe une couche limite de gaz dans laquelle la combustion ne se propage pas. En fin de combustion il subsiste donc une couche d'hydrocarbures imbrûlés qui se mélangent aux gaz pendant la phase de détente et se retrouvent finalement dans les gaz d'échappement. Pratiquement, en première approximation, la quantité de mélange air-essence non brûlée est proportionnelle à la surface s des parois de la chambre de combustion alors que le volume brûlé est égal à son volume V_0. Ainsi, la valeur du rapport $\frac{s}{V_0}$ de la chambre apparaît comme un paramètre caractéristique du taux d'imbrûlés.

Un autre facteur essentiel est la dispersion cyclique de combustion (V. chap. 2, § 5.1) susceptible de produire une proportion plus ou moins importante de cycles pour lesquels le front de flamme n'a pas atteint une partie du mélange combustible à l'ouverture de l'orifice d'échappement. Ces combustions incomplètes dépendent principalement de la vitesse de rotation du moteur, de la richesse

du mélange air-combustible, du taux de remplissage et de l'avance à l'allumage.

1.2.3. Oxyde de carbone. — La formation de l'oxyde de carbone résulte de la réaction du dioxyde de carbone et de l'hydrogène (équation d'équilibre du gaz à l'eau) : $CO_2 + H_2 \rightleftarrows CO + H_2O$. Les concentrations peuvent être calculées en fonction de la température à partir des lois régissant cet équilibre.

La teneur en oxyde de carbone est essentiellement fonction de la richesse moyenne du mélange air-combustible comme le montrent les résultats de la figure XIV-1. Cette teneur est sensiblement proportionnelle à la richesse lorsque celle-ci est supérieure à 1. La répartition du combustible entre les différents cylindres et l'homogénéité du mélange peuvent donc jouer un rôle important sur les teneurs moyennes en oxyde de carbone des gaz d'échappement d'un polycylindre.

1.2.4. Oxydes d'azote (NO_x). — L'oxyde nitrique NO peut se former par réaction directe de l'oxygène et de l'azote en raison des températures atteintes pendant les phases de combustion et de détente. Il se transforme ensuite dans l'atmosphère en dioxyde d'azote NO_2 et en divers produits d'oxydation tels qu'acides nitreux et nitriques. Les travaux de Kopa et Kimura, de Newhall, de Eyzat et Guibet de l'I.F.P., montrent que la concentration en oxydes d'azote dépend essentiellement de la température maximale de combustion.

2. MOYENS ANTIPOLLUTION

Nous n'examinerons ici que les moyens d'action concernant le moteur en considérant, d'une part, les solutions déjà adoptées et, d'autre part, les solutions en cours d'étude.

2.1. Élimination des gaz de carter. — Tous les systèmes étudiés pour résoudre ce problème sont basés sur les recyclages des gaz par l'admission du moteur. Les systèmes P.C.V. (*Positive Crankcase Ventilation*) sont obligatoires sur tous les véhicules vendus en France depuis 1966 et pour l'ensemble des États-Unis d'Amérique depuis 1968. La figure XIV-2 montre le schéma d'un dispositif de recirculation. Les gaz sont aspirés hors du carter à travers

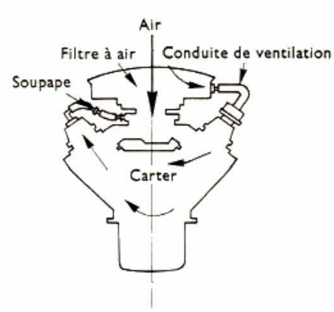


Fig. XIV-2

Contrôle des gaz du carter

une conduite munie d'un clapet et débouchant dans le circuit d'admission au niveau du carburateur. Une seconde conduite permet de diriger l'air de ventilation du filtre à air vers le carter durant le fonctionnement normal ; en cas de saturation du circuit d'aspiration elle sert à envoyer l'excès de gaz à l'admission du moteur. Ce dispositif améliore aussi la ventilation du carter et peut réduire la quantité de boue formée.

2.2. Contrôle et réduction des polluants dans les gaz d'échappement

2.2.1. Préchauffage de l'air d'admission. — Le dosage correct du mélange nécessite l'association de masses bien déterminées d'air et de combustible. Si les propriétés thermodynamiques du carburant sont peu variables, il n'en va pas de même en ce qui concerne l'air dont le degré hygrométrique, la température et la pression sont essentiellement variables en fonction du temps. Le paramètre prépondérant étant d'ailleurs la température, c'est vers sa régulation que se sont dirigés les efforts des constructeurs. Les différents dispositifs imaginés sont basés sur le préchauffage de l'air admis par mélange d'un flux d'air primaire froid et d'un flux d'air secondaire réchauffé au contact des tubulures d'échappement. Le schéma de la figure XIV-3 montre la disposition d'un tel

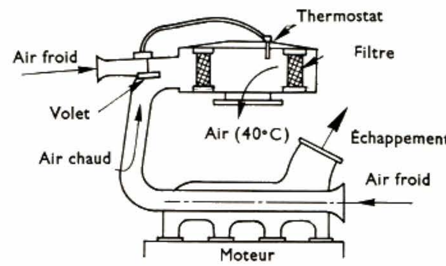


Fig. XIV-3

Schéma du préchauffage de l'air admis

système avec variation du rapport des débits air froid-air chaud par régulation thermostatique. Le procédé vise surtout à améliorer les conditions de fonctionnement par temps froid et présente l'avantage de reculer ou même de supprimer le phénomène de givrage du carburateur.

2.2.2. Amélioration de la carburation (V. chap. 10 § 6). — On peut définir la carburation comme étant l'élaboration d'un mélange air-combustible homogène et correctement dosé. Il est donc nécessaire de distinguer deux aspects de ce problème : le contrôle de la richesse globale et l'homogénéité du mélange. Ces deux aspects intéressent évidemment le constructeur du carburateur ou du matériel d'injection de combustible. L'injection à régulation électronique connaît à l'heure actuelle, et malgré son prix de revient, un intérêt croissant en raison des possibilités offertes pour l'obtention permanente d'une richesse optimale. En effet, alors que le réglage du carburateur est indépendant des conditions extérieures, le système de commande électronique permet, au moyen de capteurs et d'un calculateur, de tenir compte des conditions atmosphériques, du régime du moteur, des variations de charge, de la température d'eau de refroidissement, etc.

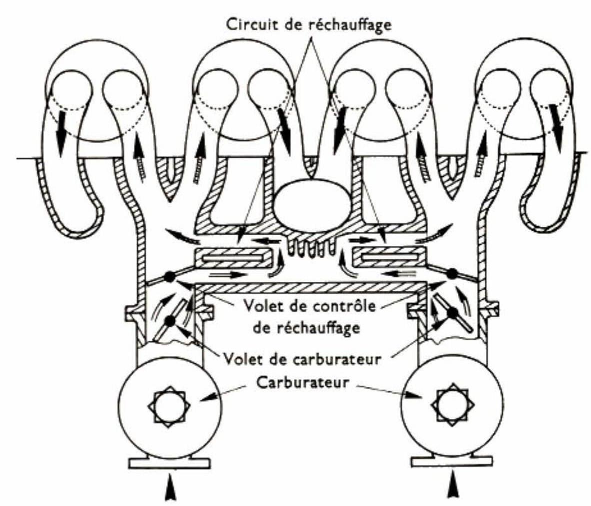
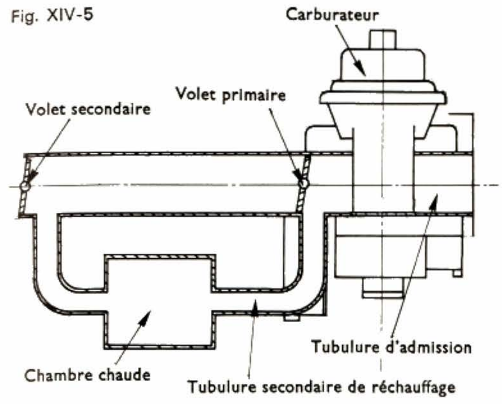


Fig. XIV-4 — Dispositif de dépollution par contrôle de l'admission

En ce qui concerne l'homogénéité du mélange, une amélioration peut être obtenue par vaporisation ou atomisation du carburant. Le dispositif mis au point par Volvo (fig. XIV-4) consiste à dériver, en fonction de la charge demandée au moteur, une partie ou la totalité du mélange sur une paroi chaude en l'occurrence les parois de la tubulure d'échappement. Cela est réalisé par le jeu des doubles volets de réglage de l'admission. La solution imaginée par Zenith (Le Duplex, fig. XIV-5) comprend une tubulure primaire pour la pleine charge et une tubulure

Fig. XIV-5



secondaire en dérivation comportant une chambre d'expansion chaude. Pour le fonctionnement à charge partielle, le premier volet est fermé et le mélange traverse le circuit secondaire dans lequel l'homogénéité est améliorée par la vaporisation du combustible dans la chambre chaude. À pleine charge les deux volets sont ouverts et le débit se fait par le circuit primaire, c'est-à-dire sans le réchauffage qui est préjudiciable au remplissage maximal de la cylindrée.

2.2.3. Stratification du mélange air-combustible. Une solution particulièrement originale, permettant la réduction des polluants par action sur la combustion à l'intérieur des cylindres, a été mise au point par l'Institut français du pétrole. Au lieu de rechercher l'homogénéité du mélange on provoque au contraire une hétérogénéité telle que la richesse du mélange soit la plus grande à

Fig. XIV-6

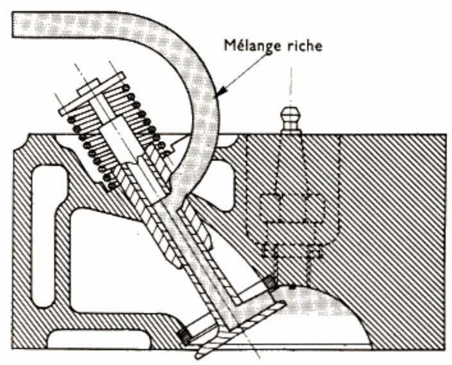


Schéma de principe du dispositif d'hétérogénéité directe

proximité de la bougie d'allumage. À cet effet l'alimentation en mélange carburé se fait par deux circuits de débit et de richesse différente (fig. XIV-6), l'un suivant les tubulures d'admission, l'autre par la tige de la soupape d'admission.

2.2.4. Recyclage des gaz d'échappement. — La principale méthode proposée pour la réduction des oxydes d'azote consiste à ajouter à la charge d'air admise dans les cylindres une substance qui ne participe pas à la combustion, mais dont la masse agit comme dissipateur de chaleur et abaisse la température maximale de combustion. Les substances que l'on peut ajouter à la charge sont l'eau et les gaz d'échappement. L'utilisation de l'eau n'est pas très pratique du fait de la nécessité d'un réservoir supplémentaire sur le véhicule et des risques de congélation.

Au contraire, le gaz d'échappement est disponible et il convient tant que sa teneur en oxygène est faible. La figure XIV-7 représente le schéma d'une installation de recyclage de gaz d'échappement qui a permis de réduire de 80 % les dégagements d'oxydes d'azote pour 16 % de gaz recyclés.

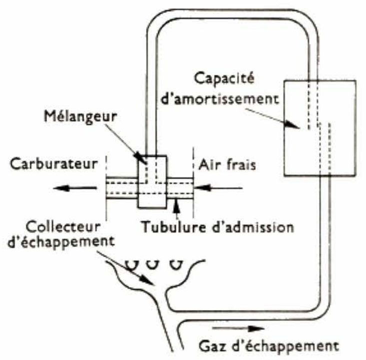


Fig. XIV-7
Circuit de recyclage de gaz d'échappement

Cette solution entraîne une diminution très sensible de la teneur en oxydes d'azote, en monoxyde de carbone et en hydrocarbures aux faibles charges grâce au fonctionnement stable en mélange pauvre qu'elle permet (zone de richesse 0,7 à 0,75). Son développement se heurte toutefois à des difficultés d'ordres technologiques.

2.2.5. Contrôle des gaz d'échappement. — L'absence de polluants au niveau du collecteur d'échappement semble encore impossible pour l'instant malgré l'action efficace des procédés mis au point depuis quelques années. Il est donc nécessaire de tenter de réduire encore la toxicité des gaz d'échappement avant leur rejet dans l'atmosphère en oxydant le monoxyde de carbone et les hydrocarbures imbrûlés. Les solutions imaginées consistent d'une façon générale à utiliser ces corps dans une combustion vive ou catalytique. Elles nécessitent :

— L'*injection d'air frais* dans l'échappement à proximité de la soupape d'échappement à l'aide d'une pompe auxiliaire.

— L'utilisation d'un *convertisseur catalytique* avec apport d'air secondaire à l'amont du dispositif.

— L'utilisation d'un *brûleur à post-combustion* avec appoint d'air frais et bougie d'allumage et éventuellement injection de combustible (fig. XIV-8).

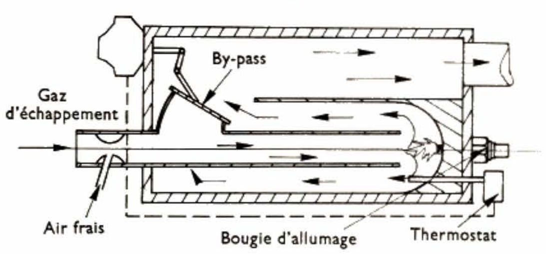


Fig. XIV-8 — Schéma de principe d'un brûleur à post-combustion

Tous ces systèmes entraînent une augmentation des températures des gaz avec tous les inconvénients que cela présente du point de vue de la détérioration des éléments de l'échappement. Leur efficacité en ce qui concerne la réduction des teneurs en monoxyde de carbone et en imbrûlés est cependant certaine mais leur prix de revient est relativement élevé par rapport à celui du moteur.

LA TRANSMISSION

CHAPITRE XV

EMBRAYAGE

1. GÉNÉRALITÉS

La courbe de couple d'un moteur à combustion interne, qu'il soit à allumage commandé ou à allumage par compression, offre deux particularités : le couple est nul à vitesse nulle ; il reste faible et permet tout juste l'entretien en rotation du moteur jusqu'à ce que l'on atteigne un régime suffisant. Contrairement au moteur électrique de traction qui, lui, fournit un couple important à vitesse nulle, le moteur à combustion interne ne peut assurer le démarrage du véhicule sans la présence d'un *système à friction* qui permet de transmettre un certain couple d'un organe lié au moteur (et animé d'une certaine vitesse de rotation) à un organe immobile lié aux roues. C'est le premier rôle de l'embrayage. De plus, la boîte de vitesses étant constituée d'un certain nombre de trains d'engrenages présentant des démultiplications différentes et étagées, le passage d'une combinaison à une autre n'est possible qu'en interrompant la liaison entre le moteur et les roues, ce qui permet de désolidariser les dentures en appui. C'est le second rôle de l'embrayage.

2. RÉALISATION DE PRINCIPE

Dans sa forme la plus simple, le dispositif d'embrayage pourrait être réalisé par un ensemble de deux plateaux (fig. XV-1 a et XV-1 b), l'un, *A*, calé sur l'arbre moteur, l'autre, *B*, solidaire de la transmission vers les roues, par un système d'appui constitué par un ressort qui exerce la pression d'entraînement nécessaire et par un dispositif de commande qui permet de supprimer cette pression (pour le débrayage) ou de la doser (pour réaliser un embrayage progressif).

3. CARACTÉRISTIQUES PRATIQUES D'UN EMBRAYAGE

3.1. La progressivité. — Il est nécessaire de pouvoir assurer une mise en rotation progressive de l'organe lié aux roues, et cela à partir d'un organe tournant lié au moteur dont la vitesse de rotation doit être suffisante pour que le couple soit appréciable. Un embrayage non progressif provoquerait des à-coups dans les organes de transmission, un patinage des pneus, et entraînerait le calage du moteur.

3.2. L'équilibrage. — Le terme a une double acception.

3.2.1. L'équilibrage statique. — Il concerne la transmission aux organes supports d'une poussée qui peut être soit celle du ressort fournissant la pression d'appui (V. fig. XV-1 a) en position embrayée, soit celle correspondant à la poussée du système de débrayage, en position débrayée (V. fig. XV-1 b). Le temps de débrayage étant, dans la majorité des cas, inférieur au temps d'embrayage, c'est la seconde disposition qui est de beaucoup la plus employée.

3.2.2. L'équilibrage dynamique. — Lié au moteur et donc pouvant tourner à une grande vitesse (7 à 8 000 tr/mn pour les moteurs de série moderne, 10 à 12 000 tr/mn pour les moteurs de compétition), le dispositif d'embrayage doit avoir un centre de gravité situé exactement sur son axe de rotation. Il est généralement fixé sur le volant du moteur et l'ensemble subit, lors de la fabrication, une opération d'équilibrage dynamique qui permet d'assurer la condition évoquée ci-dessus. Lors d'un démontage, un repérage doit être effectué pour assurer une remise en place rigoureusement conforme au montage d'origine.

3.3. La possibilité de transmettre sans glissement le couple moteur. — Cette condition se trouve réalisée par le calcul de l'embrayage au moment de l'étude du prototype. Chaque surface élémentaire *S* des pièces en contact est susceptible de transmettre un effort *E* qui est proportionnel à la pression d'appui et au coefficient de frottement des surfaces de frottement.

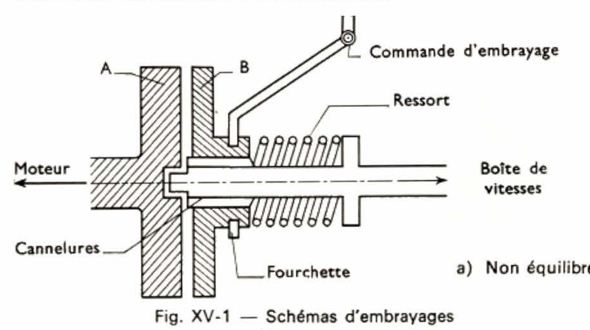
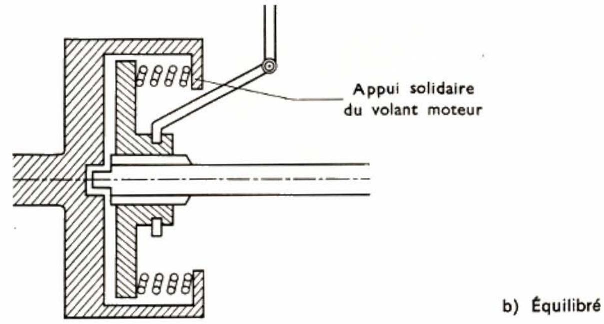


Fig. XV-1 — Schémas d'embrayages



Le couple dépendra du moment (ou encore du bras de levier) de cette force par rapport à l'axe de rotation. Nous constatons donc dès maintenant que, pour augmenter les capacités d'un embrayage, nous pourrons accroître son diamètre, les surfaces de frottement en contact, le coefficient de frottement et la pression d'appui.

L'embrayage doit, à tout moment, pouvoir transmettre le couple maximal du moteur (C_m) ; en d'autres termes, son couple de frottement C_f doit toujours être supérieur à C_m. Si nous appelons :

P la poussée totale exercée par les ressorts sur le plateau,
f le coefficient de frottement de la garniture sur sa portée,
D le diamètre extérieur des garnitures,
d le diamètre intérieur des garnitures,

le rayon moyen est : $R = \frac{D + d}{4}$.

La condition de non-patinage peut s'écrire :

$$C_m < C_f$$

Dans le cas d'un disque serré entre deux plateaux elle devient :

$$C_m < R \cdot 2\,Pf$$

La force P est en général calculée pour être égale aux trois quarts de la force théorique de poussée des ressorts neufs pour une longueur correspondant au montage d'origine de l'embrayage (garnitures neuves sous compression). Les ressorts tendent, en effet, à s'affaiblir à l'usage et l'usure des garnitures diminue leur poussée totale. Cette poussée ne peut être augmentée dans de fortes proportions, sous peine de rendre pénible la manœuvre de débrayage. L'effort à la pédale ne peut guère, en effet, dépasser 150 à 200 N alors que la course utile de celle-ci doit rester inférieure à 10 ou 15 cm ; la multiplication de l'effort par les tringleries reste donc limitée.

4. LES DIFFÉRENTS TYPES D'EMBRAYAGE

Suivant le système employé pour transmettre le couple moteur, nous distinguerons :

- les embrayages à friction,
- les embrayages électromagnétiques,
- les embrayages à poudre,
- l'embrayage hydraulique ou hydrocinétique.

4.1. Les embrayages à friction

4.1.1. Les embrayages à cônes et à rubans. — Nous ne les citerons qu'à titre documentaire.

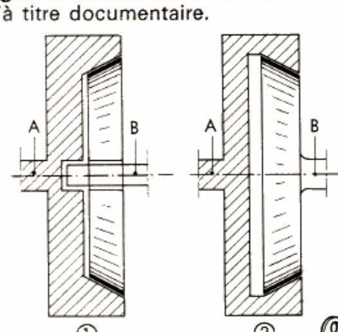


Fig. XV-2
Embrayages
1. À cône direct
2. À cône inversé
A Arbre moteur
B Arbre conduit

Les premiers, employés tout au début de l'automobile, utilisaient l'effet d'emboîtement de deux cônes l'un dans l'autre (fig. XV-2). Cet artifice permettait une pression d'application relativement grande, sans pour autant recourir à un ressort d'appui trop puissant. Les seconds ne se trouvent plus que dans certaines boîtes présélectives (genre Wilson ou Pont-à-Mousson) pour freiner progressivement des couronnes de trains épicycloïdaux (V. chap. 16).

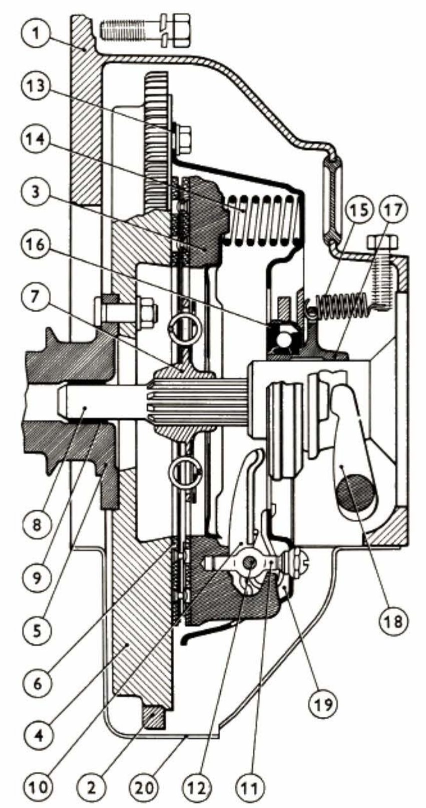
4.1.2. Les embrayages à disques. — Ce type d'embrayage équipe la presque totalité des véhicules actuels. Il allie une grande simplicité à une robustesse à toute épreuve.

1° *L'embrayage à disque unique ou à plateau ;* ce dispositif (fig. XV-3) est constitué par :

— un disque muni de deux surfaces de frottement appelées garnitures ; il est solidaire de l'arbre moteur de la boîte de vitesses (fig. XV-4) ;

— un plateau porté par une « cloche » boulonnée sur le volant du moteur.

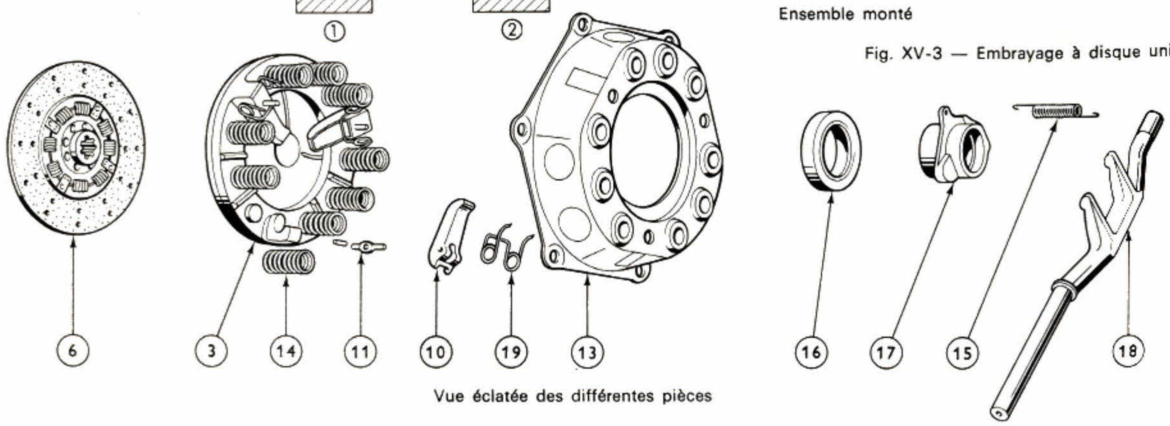
Le plateau et le volant portent deux surfaces usinées, parfaitement dressées et polies, les *glaces*, entre lesquelles le disque est serré. Le serrage est assuré par des ressorts parallèles à l'axe du dispositif, articulés entre le plateau et la cloche et dont l'appui peut être contrebalancé par l'effort



1. Carter
2. Couronne dentée
3. Plateau de pression
4. Volant
5. Vilebrequin
6. Disque de friction
7. Moyeu cannelé
8. Arbre de sortie
9. Bague guide
10. Leviers de débrayage
11. Boulon à œil
12. Axe du boulon
13. Cloche d'embrayage
14. Ressorts d'embrayage
15. Ressort de rappel
16. Butée à billes
17. Butée de débrayage
18. Fourchette de débrayage
19. Ressort de décollement
20. Carter en tôle

Ensemble monté

Fig. XV-3 — Embrayage à disque unique



Vue éclatée des différentes pièces

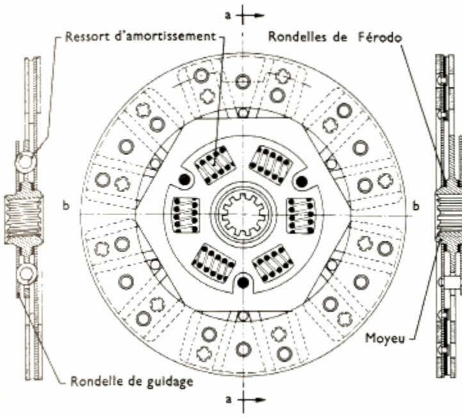


Fig. XV-4 — Disque d'embrayage (*Ferodo*)

d'une pédale. Ce dernier est transmis aux leviers d'embrayage par l'intermédiaire d'un dispositif, appelé *butée*. Nous voyons donc qu'il sera possible, en ajustant l'effort exercé sur la pédale, de « doser » la pression agissant sur le

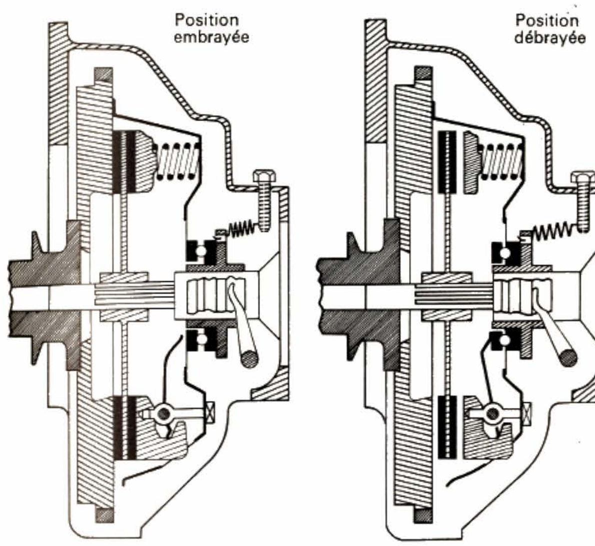


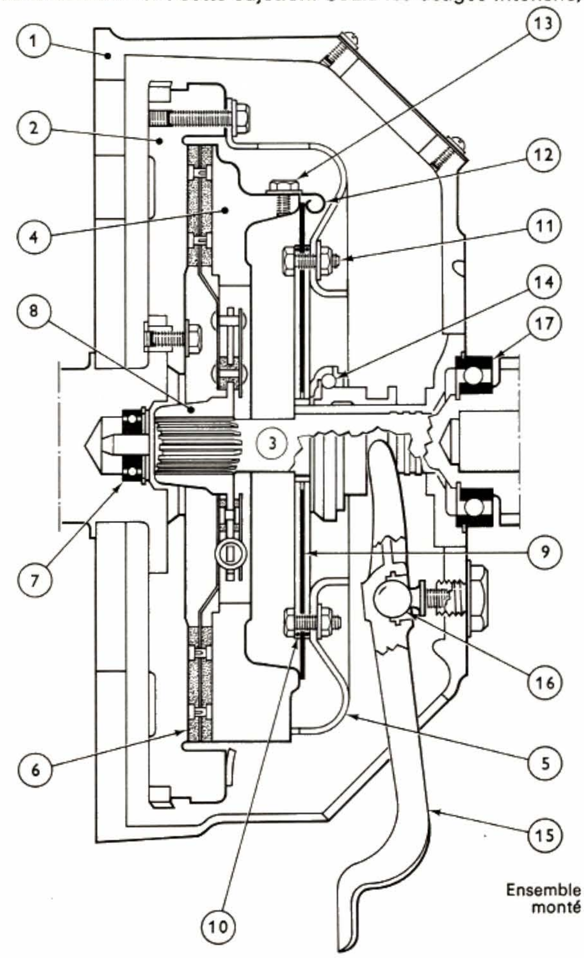
Fig. XV-5 — Schémas de fonctionnement

plateau et, par voie de conséquence, la liaison entre le moteur et le disque (fig. XV-5).

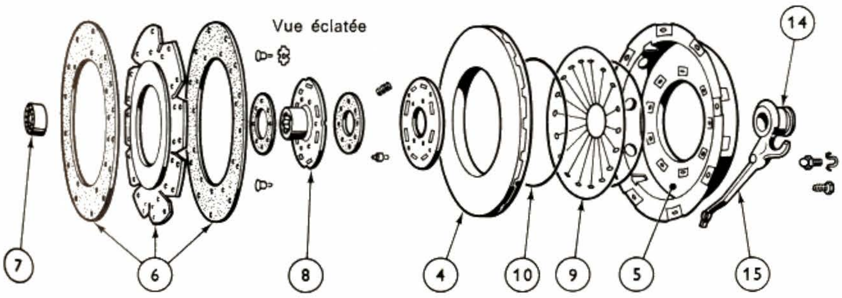
a) *Les garnitures.* — Elles sont constituées par un tissage de plomb ou de cuivre et d'amiante enrobé dans des résines. Ce matériau offre une bonne résistance à l'abrasion et à la chaleur. Il possède un coefficient de frottement élevé, tout au moins en l'absence d'huile ou de graisse qui provoquerait le patinage de l'embrayage. Il est important que l'échauffement des garnitures reste limité et, surtout, soit intermittent. Un patinage prolongé, comme celui qui peut être provoqué en laissant le pied appuyé en permanence sur la pédale de débrayage, provoque une destruction rapide de l'embrayage: les garnitures sont brûlées et des fissurations des glaces peuvent se produire. Les garnitures sont fixées sur le disque par rivetage (rivets forés en cuivre ou en aluminium) ou collage (de plus en plus fréquent).

b) *La butée d'embrayage.* — Les figures XV-3 et XV-6 indiquent la nécessité d'un organe intermédiaire entre les leviers d'embrayage (ou le ressort diaphragme) qui tournent avec le moteur, et l'organe solidaire de la pédale qui n'a qu'un simple mouvement de translation. Cet organe intermédiaire est la butée. Elle peut être à billes ou en graphite.

Le premier type a longtemps nécessité un graissage périodique; les améliorations réalisées dans le domaine des lubrifiants et la technique des roulements scellés permettent, au moins pour les usages normaux, d'espacer considérablement cette sujétion. Seuls les usages intensifs,



1. Carter
2. Volant
3. Arbre primaire
4. Plateau de pression
5. Cloche d'embrayage
6. Disque et ses garnitures
7. Roulement centreur de l'arbre primaire
8. Plateau entraineur cannelé
9. Diaphragme formant ressort d'embrayage
10. Joncs de pivotement
11. Fixation joncs et diaphragme
12. Ressort de rappel
13. Fixation du ressort de rappel
14. Butée à billes de débrayage
15. Levier à fourchette de commande
16. Pivot à rotule
17. Roulement à billes



Vue de la pièce 9

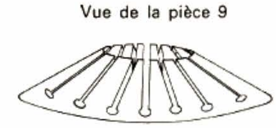
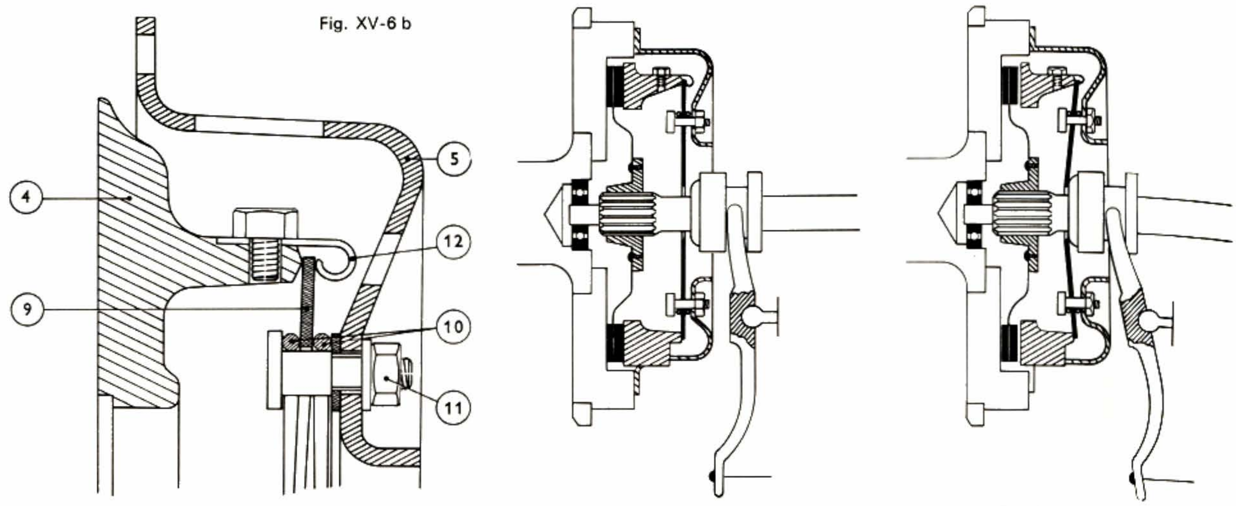


Fig. XV-6 a

Embrayage à ressort diaphragme

Fig. XV-6 b



Vue partielle montrant l'articulation du diaphragme — Position embrayée — Position débrayée

comme ceux des taxis, requièrent encore quelques gouttes d'huile une à deux fois par mois.

Le second type, sous réserve que le contact tournant se fasse sur une glace parfaitement polie, ne nécessite pas d'entretien et assure une bonne longévité.

c) *Les ressorts*

— *Les ressorts périphériques.* — Ils sont constitués de ressorts à boudin ordinaires, uniformément répartis sur la périphérie de la cloche (aux sommets d'un polygone régulier de six à douze côtés en général). Ils doivent posséder des courbes d'élasticité aussi voisines que possible pour que le plateau reste toujours parfaitement parallèle au volant. Faute de cette homogénéité des ressorts, l'embrayage « broute » et manque de progressivité.

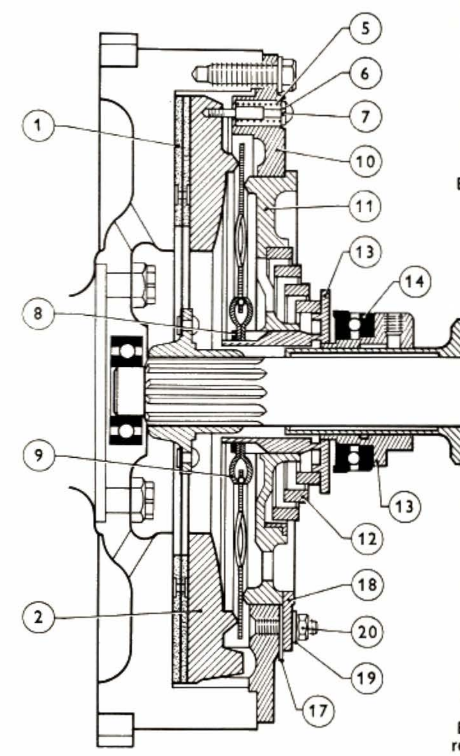
— *Le ressort central.* — Dans certaines réalisations, la poussée est exercée par un ressort central à boudin ou du type « chemin de fer ». La poussée est alors communiquée au plateau par l'intermédiaire des doigts d'embrayage (fig. XV-7 a et b). Le débrayage est obtenu par compression directe du ressort, au moyen d'un manchon et d'une butée.

— *Le ressort diaphragme.* — L'ensemble des doigts d'embrayage et des ressorts est remplacé par un ressort diaphragme en forme de tronc de cône (V. fig. XV-6 a).

Le ressort, réalisé en acier de haute qualité, est articulé, à sa périphérie, sur le plateau et, dans sa partie médiane, sur des joncs en acier portés par des axes solidaires de la cloche.

La partie centrale peut être manœuvrée par la butée. On peut ainsi annuler la compression du plateau obtenue en bandant le ressort; cela est réalisé au montage par déformation du ressort (V. fig. XV-6 b).

d) *La garde de l'embrayage.* — Au repos, c'est-à-dire en position embrayée, rien ne doit s'opposer à l'appui des ressorts sur le plateau. On réalise un certain jeu entre la butée d'embrayage et la face d'appui de celle-ci sur les organes tournants. Ce jeu constitue la « garde » qui se traduit, à la pédale, par une course morte de quelques centimètres (2 à 5 en général). Elle a pour but de réaliser en toutes circonstances une « liberté » complète de l'embrayage; elle évite tout patinage.

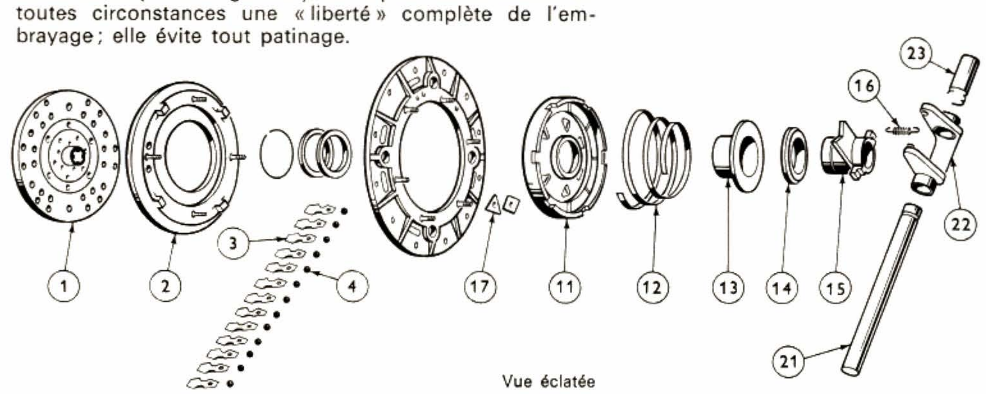


Ensemble monté

Fig. XV-7 a

Embrayage à ressort central

1. Disque à moyeu cannelé
2. Plateau de pression
3. Doigts de débrayage
4. Billes de fixation et d'articulation des doigts
5. Ressort de rappel
6. Arrêtoir de ressort
7. Goupille d'arrêt
8. Jonc de retenue
9. Cages des doigts
10. Cloche d'embrayage
11. Plateau de réglage
12. Ressort central de pression
13. Douilles d'appui du ressort
14. Butée à billes
15. Butée de débrayage
16. Ressort de rappel de la pédale de débrayage
17. Cales de réglage
18. Cales d'ajustement
19. Rondelle
20. Écrou de blocage
21. Axe d'articulation de la pédale
22. Fourchette de débrayage
23. Axe extérieur



Vue éclatée

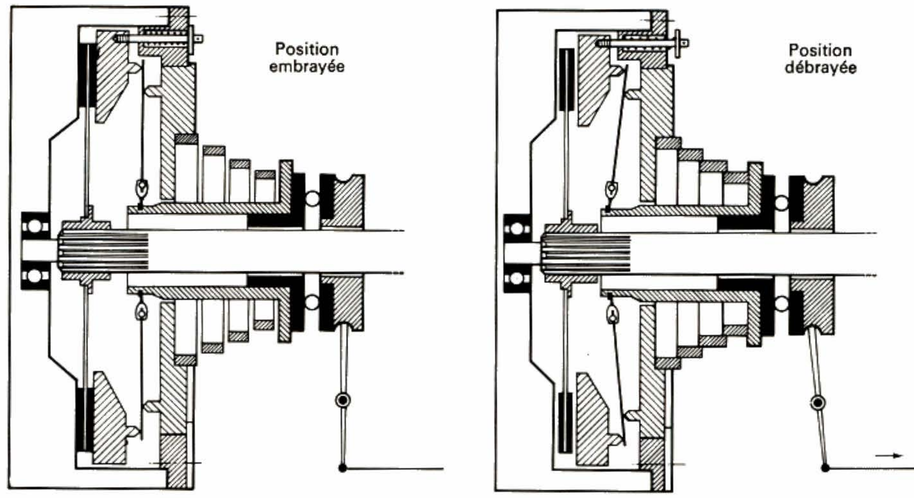
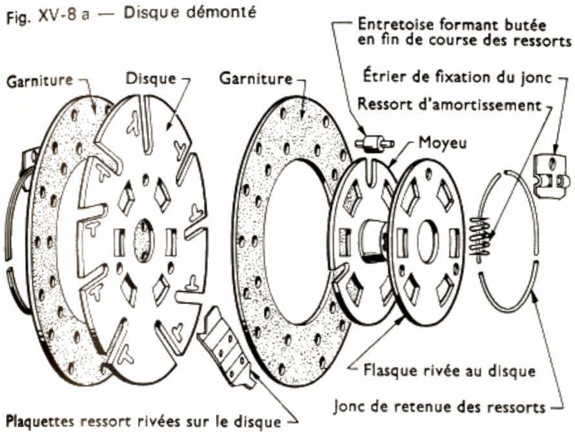


Fig. XV-7 b

Schémas de fonctionnement

Fig. XV-8 a — Disque démonté



e) *Le moyeu du disque.* — Le disque doit pouvoir se déplacer en translation par rapport à l'arbre de la boîte de vitesses, sur lequel il est monté. C'est le cas, en particulier, au moment du débrayage où il doit pouvoir se libérer de l'appui sur le volant. À cet effet, le moyeu du disque est solidarisé en rotation par rapport à l'arbre de la boîte de vitesses au moyen de cannelures. Parfois, un système élastique (ressorts ou montage «silentbloc») est interposé entre le disque et son moyeu; la souplesse qui en résulte augmente la progressivité de l'embrayage (fig. XV-8 a et b).

f) *Les dispositifs de progressivité.* — Pour favoriser la progressivité, divers systèmes sont utilisés. Ils ont pour caractéristique commune de permettre, au début de l'embrayage, une mise en contact partielle des garnitures avec les surfaces de frottement. Nous citerons les disques à fentes radiales (fig. XV-9), les disques légèrement tronconiques (fig. XV-10), les disques à plaquette-ressorts (fig. XV-11), et les disques à languettes (fig. XV-12).

En pratique, ces divers dispositifs permettent un mouvement relatif des deux faces du disque, mouvement qui facilite les régimes intermédiaires.

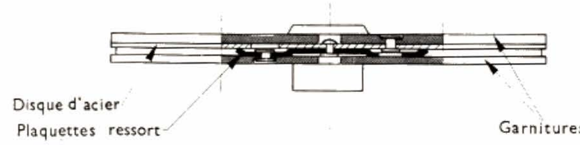


Fig. XV-11 — Coupe montrant le montage des plaquettes-ressorts rivées sur le disque

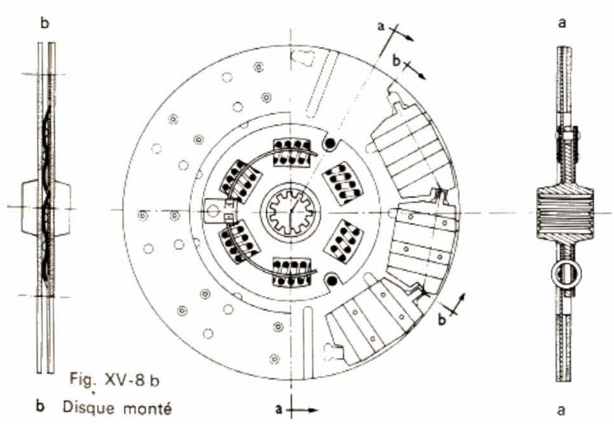
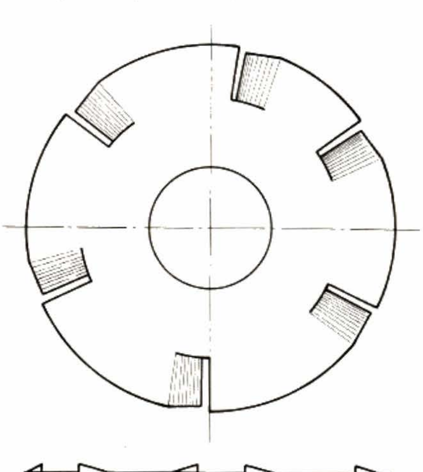


Fig. XV-8 b

b Disque monté

Fig. XV-12

Disque à languettes en relief formant ressort



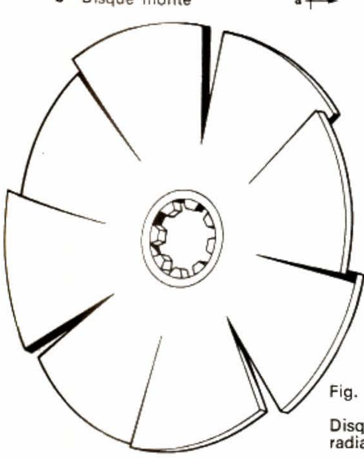


Fig. XV-9

Disque à fentes radiales

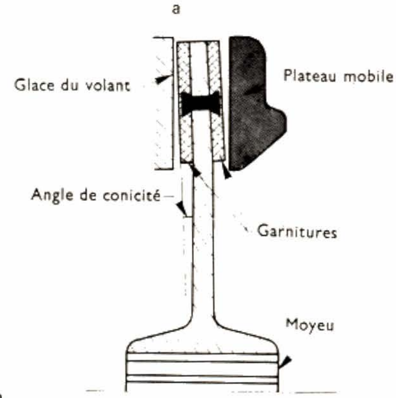
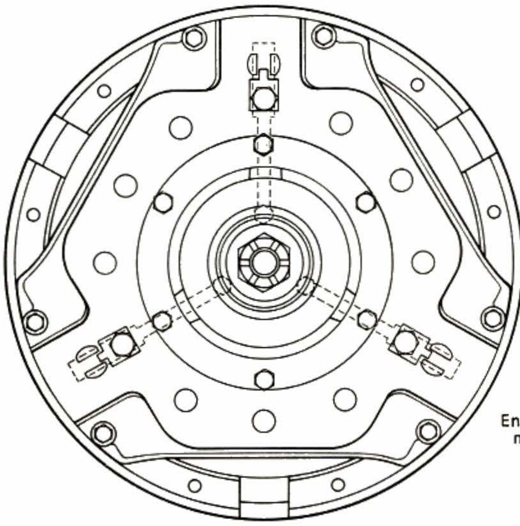


Fig. XV-10



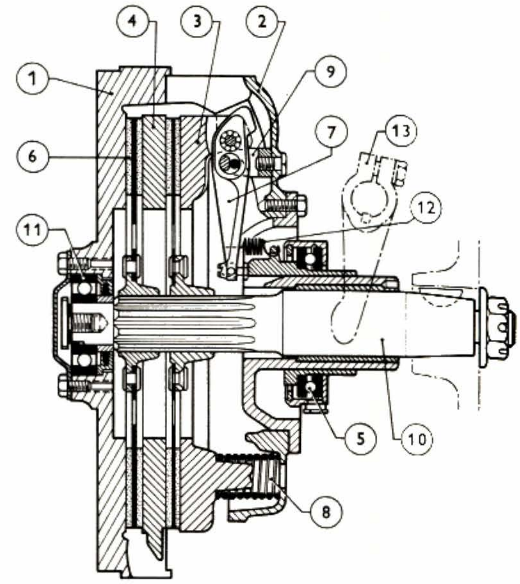
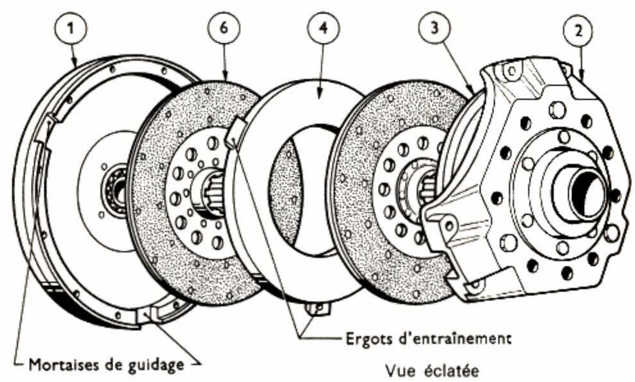


Fig. XV-13

Embrayage bidisque à ressorts et commande intérieurs (*Ferodo*)



1. Volant
2. Couvercle
3. Plateau de pression
4. Plateau intermédiaire
5. Butée à billes
6. Disques de friction
7. Leviers de débrayage
8. Ressorts d'embrayage
9. Chape d'articulation des leviers
10. Arbre de sortie
11. Roulement de centrage
12. Ressort de rappel de la butée
13. Fourchette de débrayage

2° *L'embrayage à disques multiples.* — Nous avons vu que l'embrayage à disque unique pouvait transmettre un couple important si l'on augmentait la poussée des ressorts d'embrayage et le rayon moyen des garnitures du disque. Cependant, en ce qui concerne l'augmentation de la poussée des ressorts, on est très vite limité par la pression maximale que l'on peut exercer sur la pédale et par la longueur de la course de manœuvre. L'augmentation du rayon moyen se trouve, elle aussi, très rapidement freinée pour des raisons d'encombrement et surtout d'inertie. Il est impératif, en effet, que cette dernière reste dans des limites assez étroites pour permettre rapidement la mise en œuvre des différentes combinaisons de la boîte de vitesses, sans avoir à « martyriser » les dentures de ses pignons. Les boîtes actuelles sont, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, munies de systèmes de synchronisation qui facilitent l'engrènement mais s'opposent à une trop grande inertie de l'embrayage.

Les moteurs de poids lourds, et surtout ceux à régime lent qui disposent d'un couple important, nécessitent des embrayages à disques multiples.

a) *L'embrayage bidisque.* — Ce type d'appareil est dérivé de l'embrayage à disque unique. Il comprend deux disques montés sur l'arbre primaire au moyen de cannelures. Ils sont serrés entre la glace du volant et un plateau de pression, analogue à celui décrit pour l'embrayage à disque unique. De plus, un plateau central ou intermédiaire est entraîné par la cloche au moyen de tenons ou de tiges guides qui permettent un mouvement de translation relatif par rapport à celle-ci. Le plateau porte deux glaces supplémentaires qui viennent en contact avec les deux faces libres des disques. La commande du plateau de pression est exactement semblable à celle décrite pour l'embrayage à disque unique (fig. XV-13).

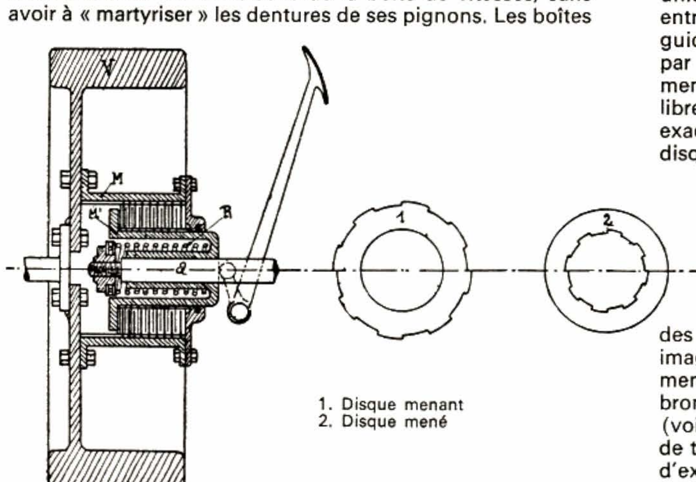


Fig. XV-14

Embrayage à disques multiples

b) *L'embrayage multidisque.* — De la même façon, des embrayages tri- ou quadridisques peuvent être imaginés; les réalisations en sont très rares. À titre documentaire, on peut également citer des appareils polydisques bronze-acier, genre Hele-Shaw, travaillant dans l'huile (voiture Delage 1925). Certaines motos modernes utilisent de tels systèmes, soit à sec, soit dans un bain d'huile, avec d'excellents résultats (125 Motobécane, motos japonaises; fig. XV-14).

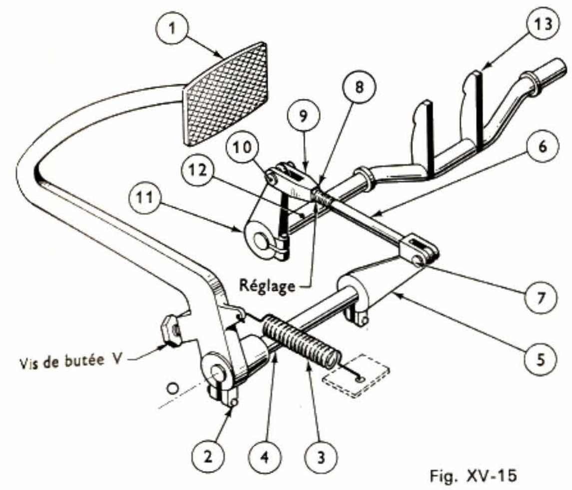


Fig. XV-15

Commande réglable par renvoi et biellette

1. Pédale d'embrayage - 2. Boulon de fixation de la pédale. - 3. Ressort de rappel de la pédale - 4. Arbre de la pédale - 5. Levier de l'arbre - 6. Tige de commande. - 7. Axe d'articulation de la tige - 8. Écrou d'arrêt de la chape réglable 9 - 10. Axe d'articulation de la chape - 11. Levier de l'arbre de commande - 12. Arbre de la fourchette de débrayage 13

4.1.3. Commande des embrayages

1° *Commande mécanique*

a) *Par tringles.* — Ce système, utilisé dès l'origine de l'automobile, offre une grande simplicité. Il est particulièrement bien adapté au système à propulsion arrière et à moteur avant (fig. XV-15). L'effort à fournir sur la pédale est voisin de 100 à 200 N, alors que celui sur la butée peut dépasser 2 000 N ; l'effort doit donc être multiplié par un nombre compris entre dix et vingt.

b) *Par câbles.* — Dès que les embrayages ont eu tendance à s'éloigner du poste de conduite (traction avant à boîte avant et système tout à l'arrière) et aussi avec l'adoption des moteurs dits « flottants », il a fallu recourir à des commandes par câbles sous gaine, analogues, aux dimensions près, aux câbles de freins de bicyclette : R4 et R8 Renault — Citroën 3 et 2 CV et DS à boîte mécanique (fig. XV-16).

2° *Commande hydraulique.* — Il était tentant de recourir aux facilités offertes par la commande hydraulique pour résoudre le même problème. La figure XV-17 (V. page 428) montre une réalisation sur les voitures Simca 1300 et 1500. Le liquide utilisé est le même que celui employé dans le système de freinage.

Très souvent, la réserve de liquide est commune, avec toutefois un dispositif de sécurité qui empêche qu'une avarie dans le système de commande d'embrayage puisse se répercuter sur le freinage et le rendre inopérant. À cet

1. Pédale d'embrayage
2. Arbre tubulaire de 1
3. Levier de commande de la tringle
4. Tringle de la pédale d'embrayage
5. Pivot à rotule
6. Bride support du pivot
7. Levier de réception du mouvement
8. Levier de renvoi
9. Ressort de rappel de la pédale
10. Arbre tubulaire des leviers
11. Chape du câble d'embrayage
12. Axe d'articulation de la chape
13. Écrou du blocage de la chape
14. Système de réglage du câble
15. Câble de commande de la fourchette
16. Levier de commande de l'embrayage
17. Gaine du câble

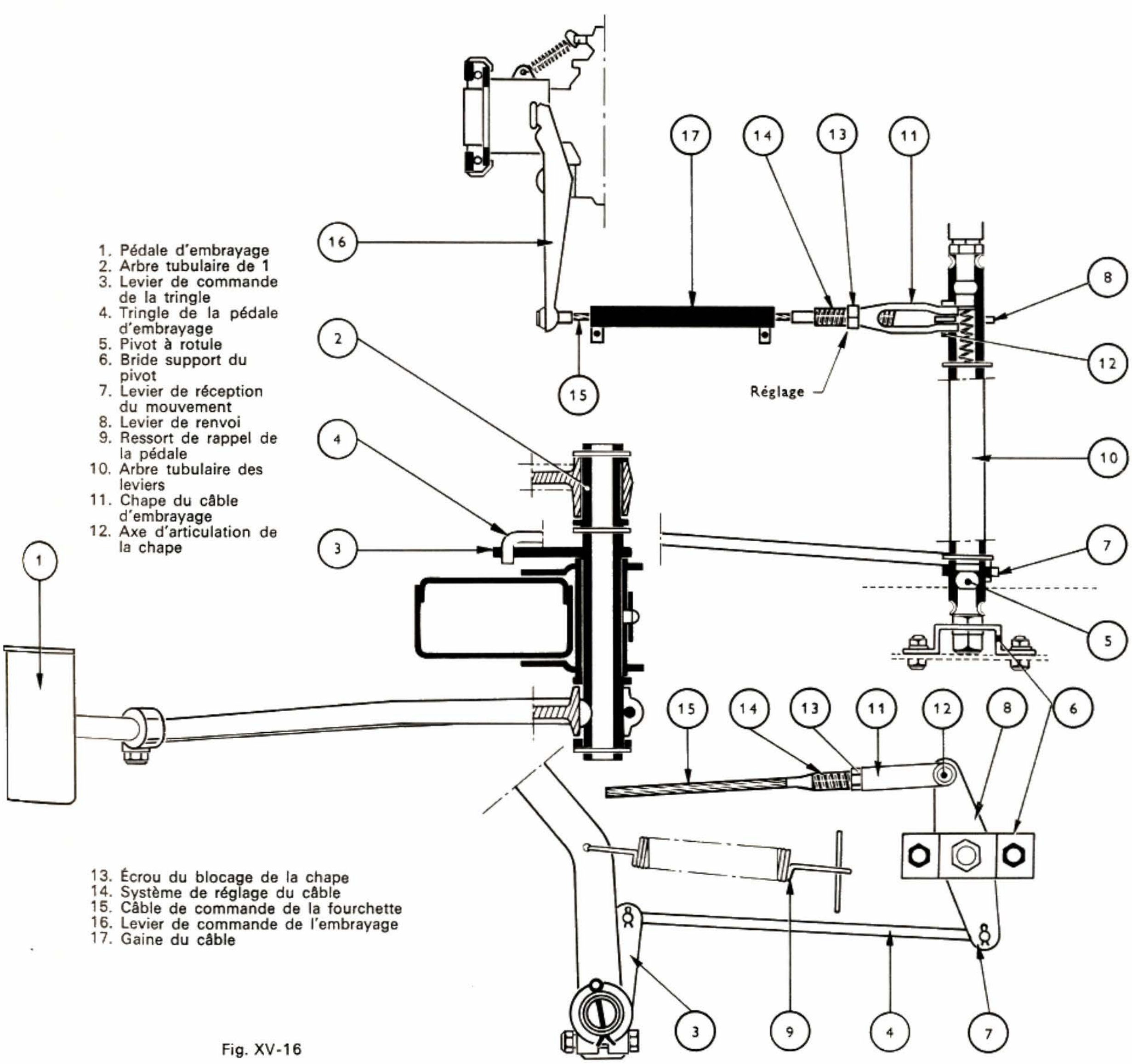
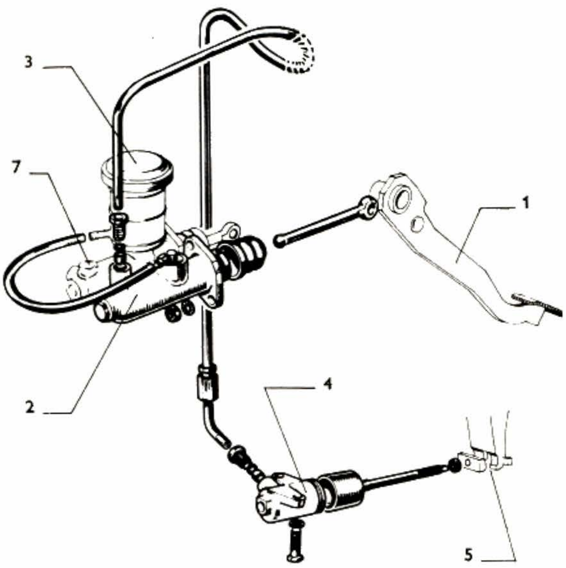


Fig. XV-16



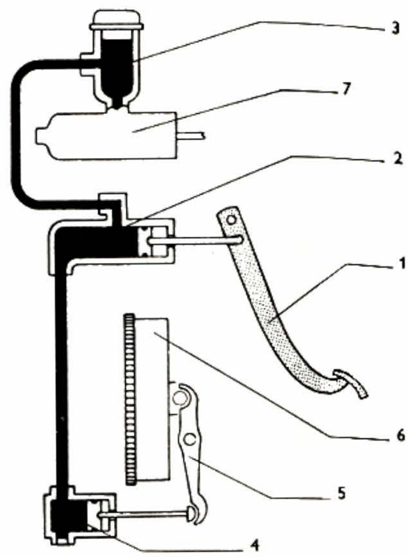


Fig. XV-17 — Commande hydraulique d'embrayage (*Simca*)

1. Pédale de débrayage
2. Maître cylindre de débrayage
3. Réservoir de liquide en charge
4. Cylindre récepteur
5. Levier de débrayage
6. Embrayage
7. Maître cylindre du système de freinage

effet, la prise d'alimentation du maître cylindre de débrayage dans le réservoir est située à un niveau plus élevé que celle du maître cylindre principal du freinage.

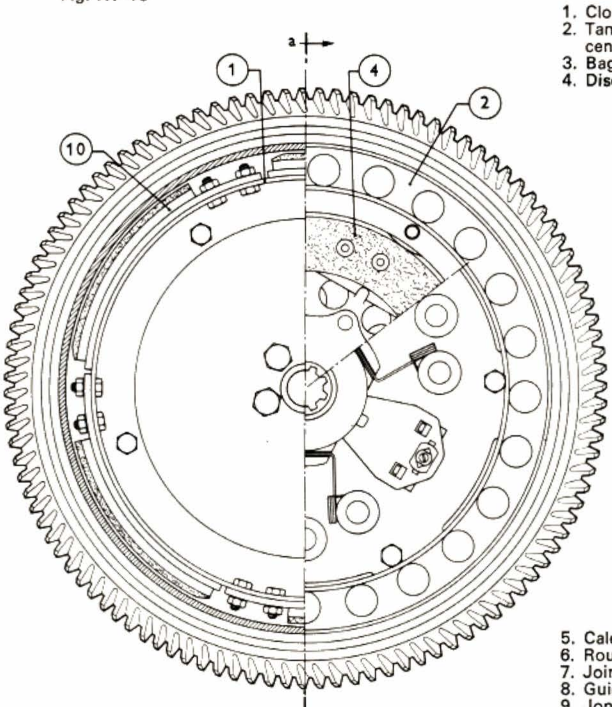
3° *Commande automatique*

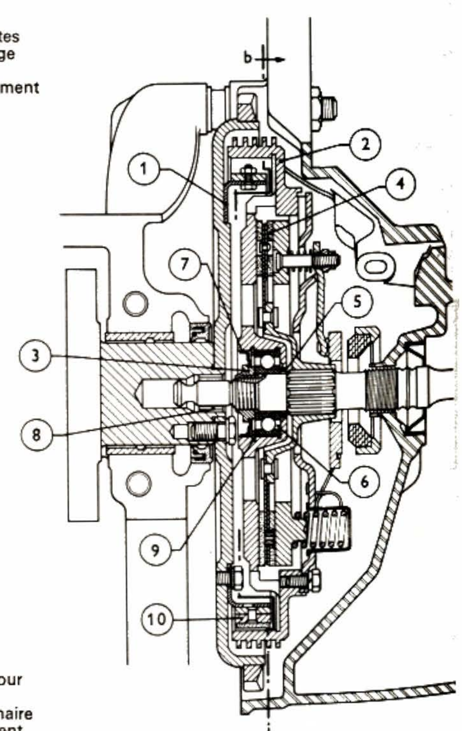
a) *Commande centrifuge.* — Dans ces réalisations, le serrage du disque entre le plateau mobile et le volant se fait en utilisant l'inertie centrifuge des masselottes liées à la cloche. Il y a embrayage lorsque la fréquence de rotation atteint 700 à 800 tours par minute et tout glissement est supprimé dès 1 000 tours par minute (l'inertie centrifuge augmente comme le carré de la vitesse de rotation). Fort intéressante pour la période de démarrage cette propriété devient très vite un handicap sérieux dès qu'il s'agit de changer la combinaison des vitesses de la boîte, opération qui, nous le rappelons, exige une interruption de la chaîne cinématique. L'effort à exercer sur la pédale croît en même temps que l'inertie centrifuge et dépasse très rapidement les possibilités du conducteur. De plus, un tel système ne permet pas la mise en route du moteur par poussée ou remorquage, puisque l'embrayage ne dépend que de la seule vitesse de rotation du volant du moteur (donc de celle du moteur).

Divers systèmes sont employés pour résoudre soit la première, soit les deux difficultés comme nous allons le voir à l'aide de deux exemples.

— Embrayage de la 2 CV Citroën. — En réalité, cet embrayage constitue un double dispositif avec, en série dans la chaîne cinématique, un embrayage centrifuge qui ne sert qu'au démarrage du véhicule et un embrayage conventionnel. La figure XV-18 montre une coupe des deux dispositifs, ainsi qu'un schéma de l'articulation des masselottes. Celles-ci portent, à leur partie périphérique, un sabot

Fig. XV-18





1. Cloche porte-masselottes
2. Tambour de l'embrayage centrifuge
3. Bague d'arrêt du roulement
4. Disque d'embrayage
5. Cale d'épaisseur
6. Roulement porte-tambour
7. Joint d'étanchéité
8. Guidage de l'arbre primaire
9. Jonc d'arrêt de roulement
10. Masselotte centrifuge

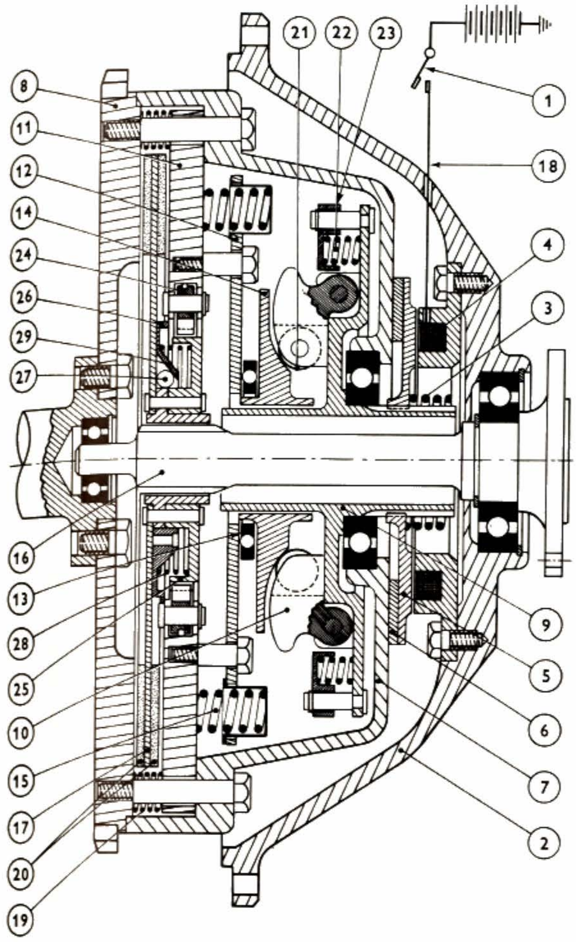


Fig. XV-19 — Embrayage centrifuge à commande électromagnétique

1. Contact - 2. Carter extérieur d'embrayage - 3. Ressort de l'embrayage auxiliaire - 4. Électroaimant - 5. Armature de l'embrayage auxiliaire - 6. Garniture de l'embrayage auxiliaire - 7. Cloche de l'embrayage principal - 8. Volant moteur - 9. Plateau cannelé - 10. Masselottes centrifuges - 11. Plateau d'embrayage - 12. Disque entraîneur - 13. Butée à billes - 14. Came - 15. Ressorts d'embrayage - 16. Arbre récepteur cannelé - 17. Disque d'embrayage - 18. Fil conducteur de l'électroaimant - 19. Ressorts de décollement du plateau d'embrayage - 20. Garnitures - 21. Rouleau des masselottes centrifuges - 22. Ressort de rappel des masselottes - 23. Anneau formant cage à ressort - 24. Cliquets à ressorts du système de freinage - 25. Roue à rochet solidaire de l'arbre récepteur - 26. Coiffe mobile - 27. Billes servant au déplacement de la coiffe - 28. Ressort de pression de la coiffe - 29. Rampe de guidage

muni de garnitures, analogues à celles du disque d'un embrayage à disque. Elles sont articulées sur des lames élastiques dont l'autre extrémité est boulonnée sur le plateau fixé au vilebrequin. Le plateau mobile peut être commandé par la pédale d'embrayage et permet le changement des vitesses. Un tel système rend impossible la mise en route par remorquage. Pour utiliser le frein moteur dans une descente, il faut également avoir le réflexe d'accélérer le moteur pour provoquer l'embrayage lorsque l'on a rétrogradé.

— Embrayage Ferodo Gravina (fig. XV-19). — Il ne comporte pas de pédale et se compose d'un embrayage conventionnel monodisque (dont le serrage du disque par le plateau s'obtient par action de masselottes articulées sur un manchon) et d'un système auxiliaire de débrayage, constitué par le manchon porte-masselottes. À la position normale celui-ci est entraîné en rotation par la cloche d'embrayage au moyen de la garniture de friction (6) sur laquelle il est appuyé par le ressort (3) ; il peut aussi être désolidarisé de la cloche et immobilisé par l'électro-aimant (4). Ce dernier est alimenté à partir de la batterie par l'intermédiaire du contact d'allumage et par un contact auxiliaire dit de point mort, qui n'est fermé que lors du passage au point mort du levier de vitesses. Ce système est équilibré mécaniquement en toutes positions, aussi bien débrayé qu'embrayé. Un dispositif particulier permet la mise en route par remorquage. Il s'agit d'une roue libre à cliquets qui solidarise le disque et le plateau mobile et dont l'action est supprimée dès que le moteur a dépassé sa vitesse de lancement (150 tr/mn environ).

b) *Servocommande.* — Le système précédent permettait de supprimer la pédale d'embrayage. Il en est de même des dispositifs à servocommande qui peuvent utiliser : soit la dépression régnant dans la tubulure d'admission (ce système n'est pratiquement plus employé), soit une pression hydraulique (comme dans l'équipement des Citroën DS 19 et DS 21 ; V. fig. XV-20).

L'embrayage est un système à disque unique ordinaire. Le système de commande est composé des éléments suivants :

— Le régulateur centrifuge et le correcteur de débrayage. — Entraîné en rotation par le moteur et situé sur le côté droit de ce dernier, le régulateur est soumis à la haute pression du système général de suspension et de freinage ; il en assure la régulation au moyen du tiroir d'embrayage automatique. La position de celui-ci dépend :

- de l'inertie centrifuge développée sur les masselottes du régulateur, aidée de la pression d'un ressort réglable par une vis ;
- de la force antagoniste développée par un autre ressort, dont l'action peut être renforcée par une pression d'huile provenant du frein avant droit et agissant sur un piston du correcteur de débrayage. Ce correcteur est monté en arrière du régulateur centrifuge. Le rôle de ce dernier dispositif est de provoquer le débrayage total dès que l'on met en œuvre le système de freinage, une vitesse étant passée ; on évite ainsi le calage du moteur. Le régulateur centrifuge n'a d'action que pendant la période de démarrage (première et deuxième vitesses) ou en marche arrière. Dans les autres combinaisons et en l'absence de pression de freinage, la vitesse de rotation du moteur ne diminue pas suffisamment pour permettre le débrayage à partir du régulateur.

— Le verrou de réembrayage. — Placé sur le côté droit de la boîte de vitesses, cet organe est solidarisé par une commande réglable à l'axe de fourchette des première et deuxième vitesses. Il a pour rôle d'empêcher le réembrayage tant que l'une ou l'autre des deux combinaisons n'est pas engagée ; une mise en prise très brutale des pignons pourrait intervenir et provoquer des détériorations à l'intérieur de la boîte.

— Le tiroir de commande automatique. — Situé dans le bloc hydraulique, cet organe détermine la pression agissant sur le piston du cylindre de commande, en fonction des informations qui lui parviendront du sélecteur, du régulateur centrifuge et du verrou de réembrayage.

— Le tiroir de débrayage à main. — Situé également dans le bloc hydraulique et entraîné par un levier placé sous le tableau de bord, cet organe a pour rôle de faire diminuer la pression dans le cylindre de commande, pour permettre la mise en route du moteur à la manivelle, ainsi que les réglages (allumages, culbuteurs, etc.). Dans ce genre de traction avant, en effet, la rotation du moteur s'effectue par l'intermédiaire de l'arbre primaire de la boîte de vitesses et de l'embrayage.

— Le correcteur de réembrayage. — Il est placé à côté du carburateur. Dans ce dispositif intervient une commande solidaire de la pédale d'accélérateur. Ce correcteur est une sorte de *by-pass*, ne fonctionnant que dans la phase du réembrayage pour contrôler la chute de pression dans le cylindre de commande et assurer la progressivité du rétablissement de la chaîne cinématique dans les changements des combinaisons de vitesses de la boîte.

— Un cylindre de commande. — Il agit sur le levier de commande de l'embrayage. La pression est uniquement utilisée pour l'action de débrayage ; l'embrayage est obtenu par diminution de cette pression.

Dans le but de faciliter les manœuvres de garage et de stationnement, et aussi pour donner plus de souplesse aux manœuvres de démarrage, le carburateur comporte un double circuit de ralenti : l'un fonctionne vers 575 tr/mn, (c'est le circuit normal de tous les véhicules et, sur les modèles *DS*, il n'est seul en circuit que lorsque l'on appuie

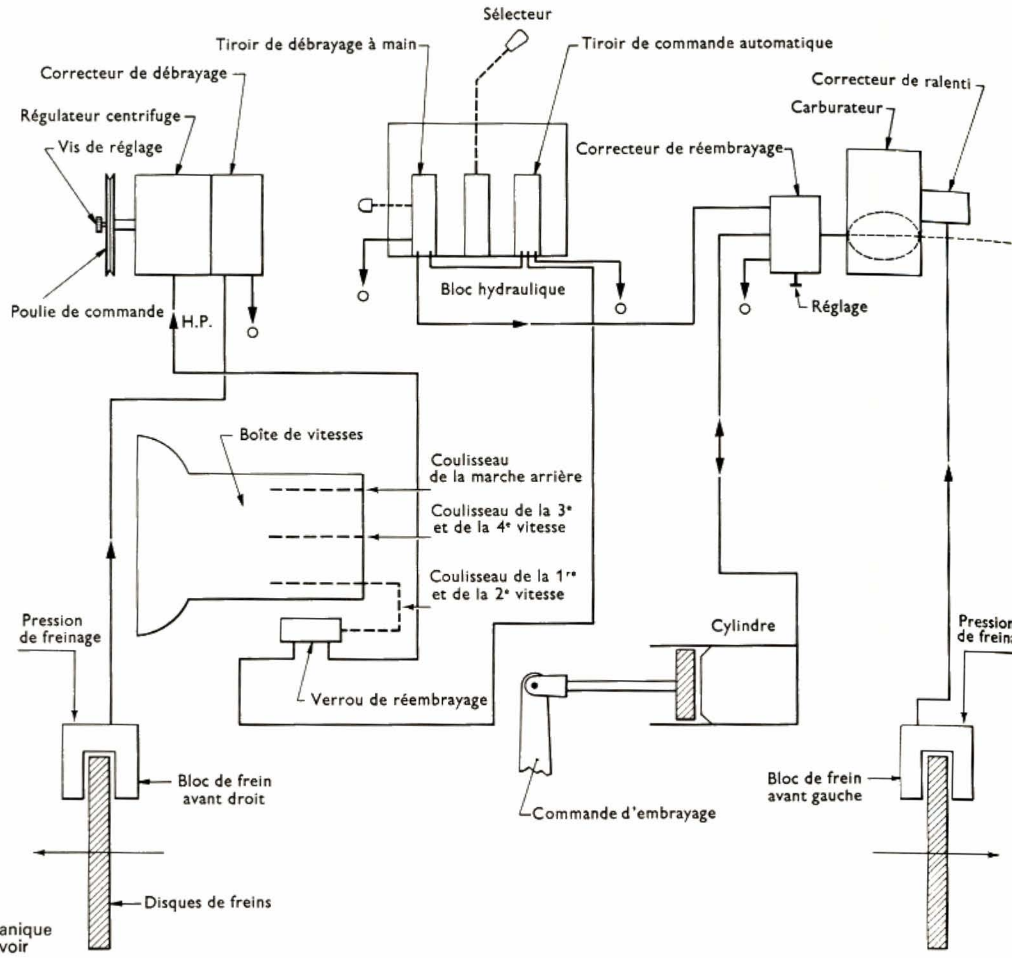


Fig. XV-20

sur la pédale de frein), l'autre dit « ralenti accéléré » est utilisé vers 875 tr/mn, lorsque l'embrayage tend à entraîner franchement le véhicule.

Entre les deux régimes et en fonction de la pression exercée sur la pédale de frein, il existe une zone de commande plus ou moins franche de l'embrayage, qui permet des manœuvres très précises. Tout se passe comme si la première partie de la course de la pédale de frein était en réalité une course de débrayage.

Cette action est facilitée par le réglage du régulateur centrifuge vers 725 tours par minute, entre les deux régimes de ralenti. La pression de commande est fournie à partir du bloc de frein avant gauche et s'exerce sur un petit cylindre dont le piston obture le by-pass du canal de « ralenti accéléré ». Ce système permet d'adopter une conduite tranquille ou sportive au gré du conducteur dont l'action intervient dans le système d'automaticité par le correcteur de réembrayage solidaire de la pédale d'accélérateur. La mise en route par remorquage n'est pas possible.

4.2. Les embrayages électromagnétiques. — Nous retrouvons, dans ces systèmes, un certain nombre d'éléments déjà connus.

Le disque d'embrayage est tout à fait semblable à celui décrit dans l'embrayage à disque unique. Il est toujours serré entre le plateau mobile et le volant, mais la pression n'est plus fournie par des ressorts. Un électroaimant noyé dans le corps du volant du moteur provoque l'attraction du plateau mobile avec une force variable en fonction de l'intensité du courant qui parcourt le bobinage. Ce courant vient, soit de la batterie, et son intensité est alors réglée par un rhéostat, soit de la dynamo, et dans ce dernier cas, la variation du courant est proportionnelle à la tension aux bornes de celle-ci avant conjonction avec la batterie (V. La route, chap. 23), c'est-à-dire, en gros, proportionnelle à la vitesse du moteur.

Dans les deux cas, l'embrayage peut être rendu progressif en agissant sur les caractéristiques du courant dans l'électroaimant. En revanche, le débrayage ne pourra se faire suivant une loi de décroissance inverse du courant car le magnétisme rémanent maintient le plateau en contact avec l'électroaimant. Des ressorts énergiques sont nécessaires pour provoquer le décollement. Nous nous bornerons à citer deux réalisations relativement récentes.

4.2.1. L'embrayage Ferlec (fig. XV-21). — Utilisé sur certains modèles Renault, il y a quelques années, et réalisé par la société Ferodo, l'embrayage Ferlec comprend le mécanisme avec ses éléments principaux :

— La culasse (comportant la bobine de l'électroaimant) disposée dans le volant du moteur.

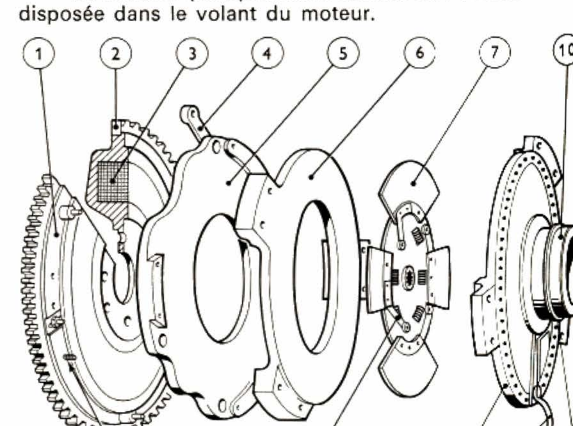
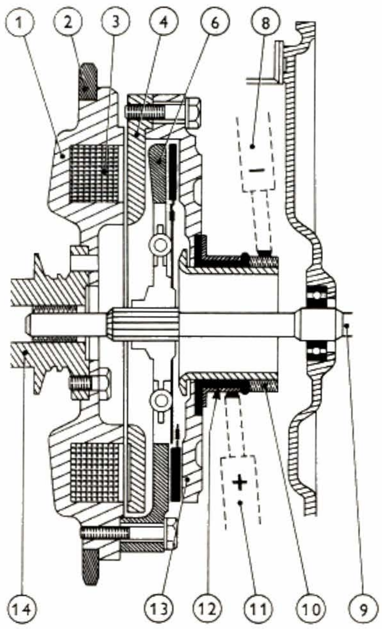


Fig. XV-21 a

Schéma d'un embrayage Ferlec

Fig. XV-21 b

1. Culasse
2. Couronne du démarreur
3. Bobine
4. Plaquette d'entraînement
5. Armature
6. Plateau intermédiaire
7. Friction
8. Porte-charbon d'alimentation de masse
9. Arbre de boîte de vitesses
10. Bague collectrice de courant de masse
11. Porte-charbon d'alimentation positif
12. Bague collectrice de courant, positive
13. Plateau de pression
14. Vilebrequin
15. Plaquette de rattrapage des jeux de transmission
16. Ressorts de rappel et colonnette



— L'armature, liée à la culasse en rotation, mais susceptible de translation par rapport à elle.

— Le plateau fixe intermédiaire.

— Le plateau mobile.

— Un disque de friction.

Le groupe culasse-plateau intermédiaire, monté en bout du vilebrequin, entraîne en rotation le groupe armature-plateau de pression par l'intermédiaire de trois plaquettes. Elles assurent le centrage de ce dernier groupe et l'acheminement du courant à la bobine de l'électroaimant à partir de deux bagues collectrices fixées sur le plateau mobile. L'alimentation en courant est faite à partir de la dynamo mais divers circuits sont prévus pour permettre à la batterie de suppléer la dynamo en cas de défaillance de celle-ci, ou pour la mise en route par remorquage. Des ressorts de décollement de l'armature assurent le débrayage quand le courant est coupé.

4.2.2. L'embrayage Simcamatic. — Il est également à commande électromagnétique. Il diffère du précédent par les réalisations du système d'embrayage et des commandes des circuits électriques. L'embrayage proprement dit (fig. XV-22) est constitué par le volant du moteur qui sert de plateau d'appui au disque d'embrayage porte-garnitures calé sur l'arbre récepteur et par un plateau mobile qui vient presser la garniture contre le volant. Le plateau mobile est solidaire en rotation du volant mais il peut se déplacer par rapport à celui-ci suivant leur axe commun. De même, l'électroaimant est entraîné par le volant mais avec une possibilité de coulissement. De plus, une troisième pièce, l'armature, est également solidaire du volant mais elle est fixe par rapport à ce dernier.

Quand l'électroaimant est alimenté (par l'intermédiaire du balai), il tend à attirer l'armature mais, comme celle-ci est fixe, c'est lui qui se déplace. Il communique son mouvement au plateau mobile qui presse alors la garniture d'embrayage sur le volant. Quand l'excitation de l'électroaimant cesse, trois ressorts à lame ramènent le plateau mobile et l'électroaimant vers l'arrière, ce qui libère le disque.

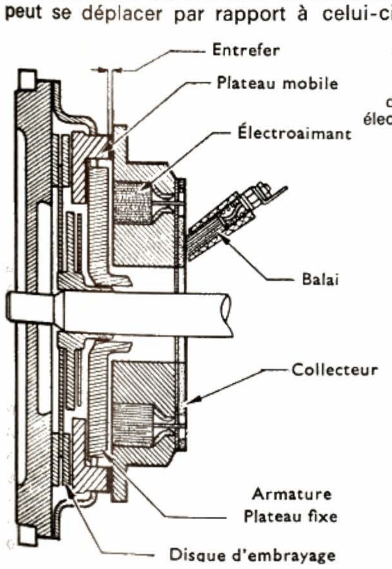


Fig. XV-22
Schéma d'embrayage électromagnétique (*Simca*)

4.3. L'embrayage à poudre (fig. XV-23). — Le coupleur électromagnétique, dont le principe a été découvert aux États-Unis d'Amérique, utilise la propriété d'une poudre magnétique de s'orienter suivant le champ magnétique auquel elle est soumise en même temps qu'elle acquiert, par le phénomène de « cohérence », une compacité proportionnelle à l'intensité de ce champ magnétique.

Dans son principe, le coupleur comprend deux solides de révolution. L'un, extérieur, formé par le volant du moteur, comporte une bobine torique noyée dans la masse. L'autre, intérieur, est solidaire de l'arbre primaire de la boîte de vitesses. L'entrefer, situé entre les deux solides de révolution, est empli d'une poudre métallique inoxydable, en suspension dans l'huile.

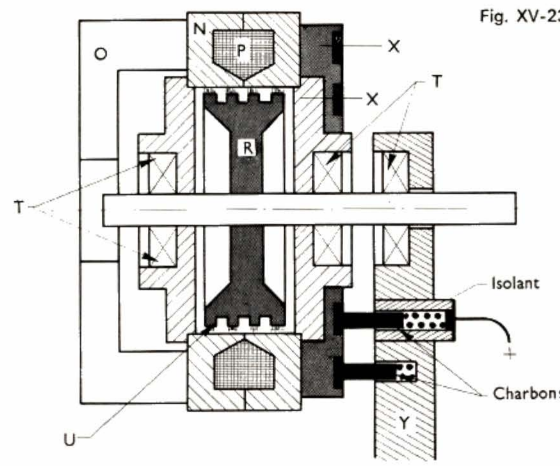


Fig. XV-23

Le bobinage est alimenté en courant continu à partir de la batterie. Le coupleur présente les propriétés suivantes (fig. XV-24) :

— Le couple transmis est proportionnel à l'intensité du courant inducteur. En réalité, cette courbe n'est linéaire que

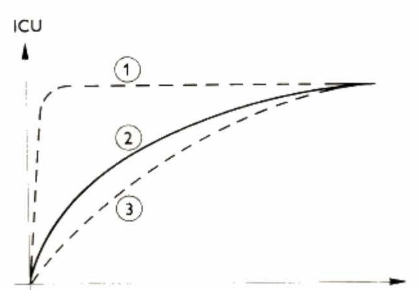
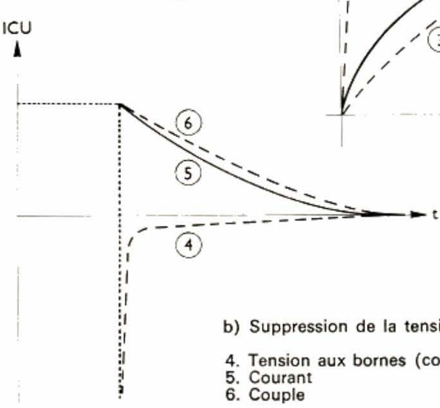


Fig. XV-24

a) Application d'une tension U

1. Tension U
2. Établissement du courant I
3. Couple C



b) Suppression de la tension U

4. Tension aux bornes (coupures)
5. Courant
6. Couple

dans sa partie centrale. Ses deux extrémités ont une allure asymptotique par suite de phénomènes de rémanence et de saturation.

— Le couple transmis est indépendant de la vitesse de rotation des éléments et du glissement, c'est-à-dire de la différence $\frac{\omega_m - \omega_r}{\omega_m}$ si ω_m est la vitesse de l'élément menant et si ω_r est la vitesse de l'élément récepteur ou mené.

En réalité, une faible variation de couple de 5 % peut se produire quand le glissement passe de 0 à 100 %.

— La réponse à l'embrayage et au débrayage n'est pas immédiate du fait de la constante de temps du circuit de l'électroaimant, fonction du rapport $\frac{L}{R}$ de l'inductance L et de la résistance R du circuit, facteurs dépendant de l'hystérésis magnétique du circuit et des courants de Foucault dans les deux solides de révolution (du fait de l'inductance du circuit, l'établissement ou la coupure du courant ne sont pas instantanés).

En service, cet embrayage présente les qualités suivantes : usure pratiquement nulle, puissance absorbée très faible, possibilité de servocommande et construction très simple.

En revanche, deux défauts viennent alourdir le bilan : la centrifugation de la poudre magnétique après un parcours assez long à grande vitesse et, inversement, la décantation de celle-ci après un repos de longue durée, troublent le fonctionnement et peuvent empêcher le débrayage.

4.4. L'embrayage hydraulique. — On préfère souvent donner à ce type d'embrayage le nom de coupleur hydrocinétique, pour bien marquer la nature très particulière de l'action de l'huile. En effet, le liquide n'agit que par son énergie cinétique, indépendamment de toute idée de pression. Dus à l'Allemand Föttinger, ces appareils ont été employés vers 1905 dans les transmissions des navires entre turbines à vapeur et hélice, avec un organe de réaction qui les apparentait au convertisseur de couple que nous verrons au chapitre suivant. Quelques années plus tard, vers 1908, ils étaient employés sans organe de réaction pour atténuer les irrégularités cycliques des gros diesels rapides de la marine allemande.

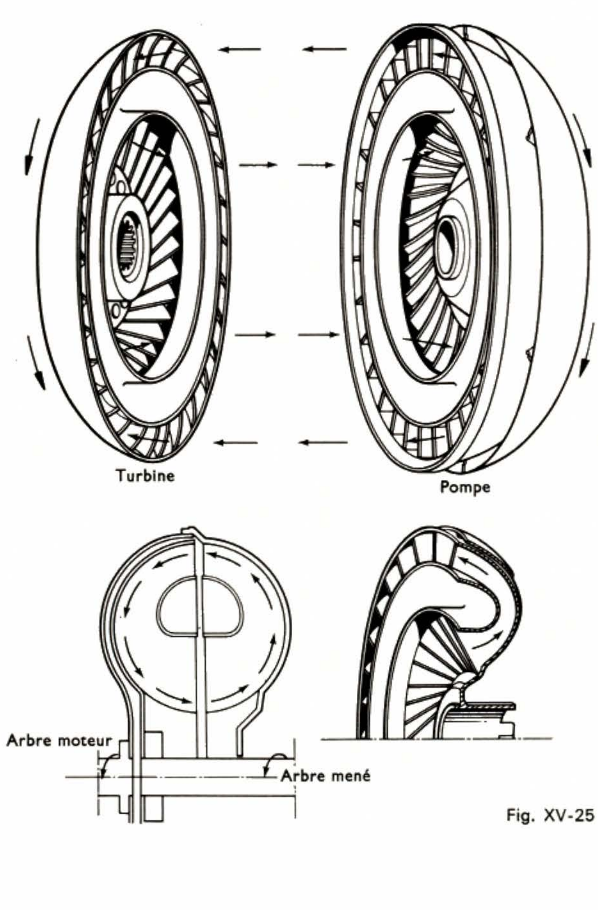


Fig. XV-25

4.4.1. Description et fonctionnement. — Le coupleur hydraulique consiste essentiellement en deux turbines (fig. XV-25) placées symétriquement par rapport à leur plan de liaison et ayant la forme d'un demi-tore. Des cloisons, placées suivant des diamètres et réparties sur la circonférence, déterminent des alvéoles dont les sections sont égales ou obéissent quelquefois à une loi plus compliquée pour éviter les phénomènes de résonance. Ces deux organes sont enfermés dans un réservoir empli d'huile. L'énergie cinétique est imprimée à l'huile par l'un des demi-tores, appelé pompe ou organe primaire. La rotation de cette pompe entraîne, par l'intermédiaire des cloisons l'éjection d'huile vers la périphérie. Cette huile, injectée dans la turbine, revient par le centre dans la pompe et sa trajectoire est une spirale inscrite dans un tore. À sa sortie de la pompe, le liquide possède une vitesse absolue $\vec{V_a}$ (fig. XV-26). Le vecteur vitesse $\vec{V_a}$ est la somme géométrique :

— du vecteur vitesse d'entraînement $\vec{V_e}$ qui dépend de la vitesse linéaire de la section moyenne de l'orifice de sortie et donc du produit de la vitesse angulaire ω et du rayon moyen R,

— du vecteur vitesse relative $\vec{V_r}$ liée à l'inertie centrifuge et donc proportionnelle à $\omega^2 R$.

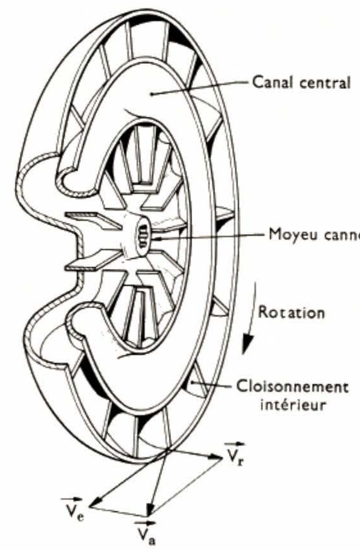


Fig. XV-26

Dans l'élément récepteur ou turbine, le couple développé est la somme des couples élémentaires des filets d'huile. La force appliquée sur une surface par un filet d'huile est égale à :

$$F = \rho s V^2 \cos\alpha = mV \cos\alpha$$

en appelant :

ρ la masse volumique de l'huile,
s la section du filet,
V la vitesse absolue du filet d'huile,
m la masse d'huile arrivant en une seconde sur la surface.

En effet $m = \rho s V$ et mV représente la quantité de mouvement du filet d'huile.

Remarques :

1° L'inertie centrifuge développée dans la pompe ne sera suffisante pour vaincre l'adhérence du fluide qu'à partir d'une certaine vitesse de rotation. Ces coupleurs permettront donc un débrayage plus ou moins franc pour les faibles vitesses de rotation.

2° La turbine, étant elle aussi susceptible d'imprimer au liquide une inertie centrifuge s'opposant à celle développée dans la pompe, la condition nécessaire à la circulation sera une différence d'inerties centrifuges dans les deux éléments (et par conséquent une différence de vitesse de l'élément turbine par rapport à l'élément pompe) suffisamment grande. Le glissement g, dont nous rappellerons tout à l'heure le rôle fondamental, et qui représente

la différence relative de vitesse entre l'élément pompe (ω_p) et l'élément turbine (ω_t) par rapport à l'élément pompe :

$$g = \frac{\omega_p - \omega_t}{\omega_p}$$

devra être suffisamment grand.

4.4.2. Lois régissant l'embrayage hydraulique.

1° Le couple secondaire est égal au couple primaire. La description précédente montre que, par symétrie et également par suite de l'absence d'élément pouvant faire intervenir une réaction, nous ne pouvons qu'admettre l'égalité des couples. Ce raisonnement « par défaut » se vérifie expérimentalement.

2° Le couple transmissible est proportionnel au glissement. Cette propriété constitue à la fois un des grands avantages de l'embrayage hydraulique mais constitue un handicap sérieux. En effet, si l'appareil peut transmettre des couples très grands sous un volume réduit, et est donc particulièrement intéressant pour la période de démarrage, il faudra se garder de l'utiliser longtemps dans les régimes intermédiaires.

3° La puissance transmise étant le produit du couple et de la vitesse de rotation, le rendement de l'appareil variera en sens inverse du glissement. On ne pourra donc utiliser qu'une faible partie des possibilités du coupleur pour garder un rendement acceptable.

L'égalité des couples étant admise, le rendement r sera égal au rapport :

$$\frac{\omega_t}{\omega_p}$$

La formule du glissement donnée précédemment peut s'écrire :

$$g = 1 - \frac{\omega_t}{\omega_p} = 1 - r$$

Nous voyons donc que r est égal à $1 - g$.

4° Le glissement est proportionnel au couple *effectivement transmis* T et inversement proportionnel au produit de la puissance cinquième du diamètre D et du carré de la vitesse de rotation ω :

$$g = \frac{kT}{\omega^2 D^5}$$

k est un coefficient dépendant de la conception et de la réalisation de l'appareil. Cette formule montre à nouveau que g sera grand et, par voie de conséquence, que le rendement sera faible pour les couples importants appliqués à faible vitesse. Elle montre également qu'une très faible augmentation du diamètre permettra d'accroître, de façon sensible, les possibilités de l'appareil puisque, pour un glissement déterminé, la puissance transmissible pourra s'exprimer par la formule suivante :

$$P = k' \omega^3 D^5$$

La nécessité du glissement et la proportionnalité au couple *transmissible* peut se vérifier aisément. Supposons que le plan de la figure matérialise le plan tangent aux aubages des éléments pompes et turbines perpendiculairement au plan de liaison. Reprenons la définition de la vitesse absolue $\vec{V_a}$ d'une particule d'huile, somme géométrique de la vitesse d'entraînement $\vec{V_e}$ et de la vitesse relative $\vec{V_r}$. En passant de la pompe à la turbine, cette

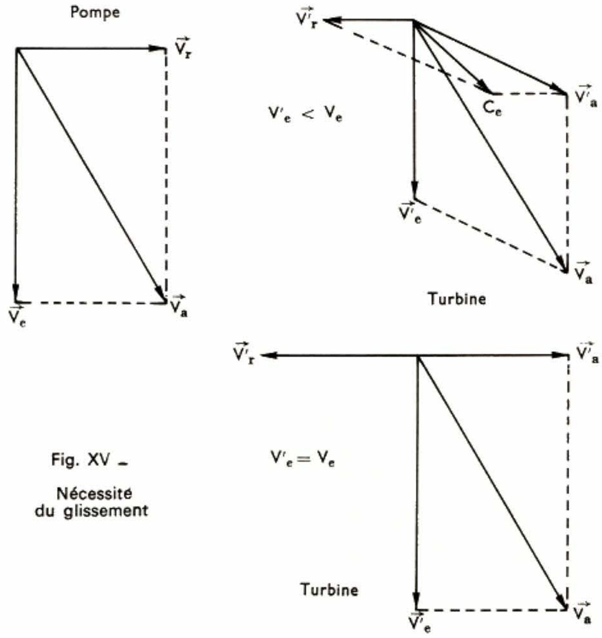


Fig. XV – Nécessité du glissement

particule va être soumise à une nouvelle vitesse d'entraînement $\vec{V'_e} < \vec{V_e}$ et à une nouvelle vitesse relative $\vec{V'_r}$ inférieure et de sens contraire à $\vec{V_r}$ (fig. XV-27).

La différence géométrique de $\vec{V_a}$ et de $\vec{V'_e}$ est $\vec{V'_a}$; la somme géométrique de $\vec{V'_a}$ et $\vec{V'_r}$ donne la composante d'entraînement de la turbine $\vec{C_e}$. Nous voyons que si :

$$\vec{V_e} = \vec{V'_e} \text{ et } \vec{V'_r} = -\vec{V'_a}\text{; alors : } \vec{C_e} = 0$$

Inversement, si $\vec{V'_e}$ est très petit par rapport à $\vec{V_e}$, $\vec{V'_a}$ tend à égaler $\vec{V_a}$, $\vec{V_r}$ est petit, $\vec{C_e}$ tend également vers $\vec{V_a}$ et est maximale.

L'embrayage hydraulique permet le lancement du moteur par remorquage et également le frein-moteur ; son fonctionnement est, en effet, absolument symétrique, l'élément turbine pouvant devenir l'élément pompe si sa vitesse de rotation devient supérieure à celle de l'autre élément.

Ce dispositif constitue également un très bon système de protection du moteur et de la transmission contre les vibrations et les fausses manœuvres. Par ailleurs, la conduite, surtout en ville, est grandement facilitée.

À l'inverse, son rendement relativement faible entraîne une augmentation de la consommation et le passage des vitesses demande un certain doigté, au moins avec les boîtes à pignons baladeurs.

Dans les réalisations de boîtes automatiques, le coupleur est employé avec des trains planétaires qui suppriment les difficultés de passage des vitesses. La faiblesse du rendement est compensée par des chaînes cinématiques particulières qui évitent d'appliquer un couple important à faible vitesse de rotation en dehors des périodes de démarrage.

Dans d'autres réalisations, les deux éléments du coupleur sont solidarisés une fois la période de démarrage achevée. Le glissement est alors supprimé.

CHAPITRE XVI

BOÎTE DE VITESSES

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Rôles de la boite de vitesses. — Située dans la chaine cinématique, entre l'embrayage et l'arbre de transmission qui transmet le mouvement au renvoi d'angle ou au démultiplicateur, la boîte de vitesses a trois rôles principaux et un rôle accessoire:

— Dans la position dite de point mort elle permet de séparer le moteur des roues motrices. Nous avions déjà vu, dans l'étude de l'embrayage, que cet organe pouvait lui aussi interrompre la transmission du mouvement mais cela nécessite une action permanente sur la pédale dans le cas des embrayages conventionnels. Pour la mise en route du moteur, son réchauffage, ses réglages, le point mort de la boîte apporte une facilité et une sécurité supplémentaires.

— Elle donne la possibilité d'inverser le mouvement de l'arbre de transmission au moyen de la combinaison de marche arrière, et donc de faire reculer le véhicule pour les manœuvres.

— Elle réalise une démultiplication variable entre le moteur et les roues. C'est là son rôle le plus important. Cette démultiplication varie:

- soit de façon discontinue avec trois, quatre ou cinq combinaisons dans les boîtes ordinaires des voitures particulières ou avec huit à dix combinaisons dans les poids lourds;
- soit de façon continue dans les boîtes hydrauliques et les transmissions à courroies.

— De plus, l'arbre de sortie de la boîte liée aux roues entraîne la prise de mouvement du compteur de vitesses et des totalisateurs kilométriques.

1.2. Nécessité de la boîte de vitesses. — Nous savons que le moteur à combustion interne fournit une puissance qui est le produit de la vitesse de rotation du vilebrequin et du moment du couple d'entraînement mesuré sur ce même arbre (moment du couple moteur).

Nous avons déjà souligné que ce couple n'est appréciable qu'à partir d'une vitesse variable avec chaque type de moteur, le plus souvent au-delà de 700 à 800 tr/mn. Le couple croît avec l'ouverture du papillon des gaz. À pleine ouverture de ce dernier, le couple varie avec la vitesse de rotation du moteur; il commence par croître, atteint un maximum puis décroît. La figure XVI-1 donne les courbes de couple et de puissance du moteur de la Citroën GS, établies comme à l'accoutumée à pleine accélération.

Nous constatons que le couple maximal se situe vers les deux cinquièmes de la plage d'utilisation du moteur. En pratique, pour les vitesses courantes d'utilisation, le couple moteur à pleine ouverture varie dans d'assez faibles limites.

À l'inverse, les besoins du véhicule en couple varient constamment:

— pour la mise en mouvement du véhicule et les accélérations;
— suivant le profil de la route: montée ou descente;
— suivant la charge.

De plus, la résistance à l'avancement varie comme le carré de la vitesse du véhicule par rapport à l'air. En pratique, l'influence de ce dernier facteur n'est sensible que pour des vitesses relativement importantes (plus de 90 km/h) et, sur la plupart des véhicules, la boîte de vitesses a alors terminé son rôle d'adaptation du couple résistant au couple moteur.

Sur un véhicule, il serait théoriquement possible de monter un moteur assez puissant pour pouvoir absorber les rampes les plus fortes mais, en dehors de circonstances assez particulières, le moteur fonctionnerait à charge réduite avec une utilisation très mauvaise et, en particulier, une consommation importante. De plus, dans beaucoup de pays, les régimes fiscaux et les assurances pénalisent les moteurs puissants et surtout ceux possédant un régime

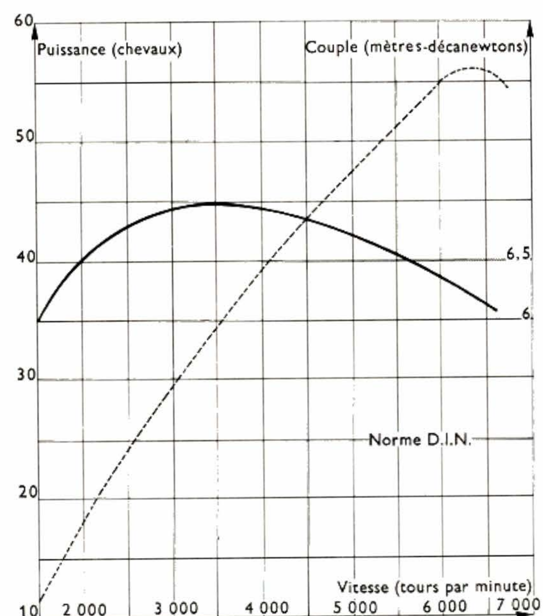


Fig. XVI-1 — Courbes de puissance (---) et couple moteur (—) de la Citroën GS

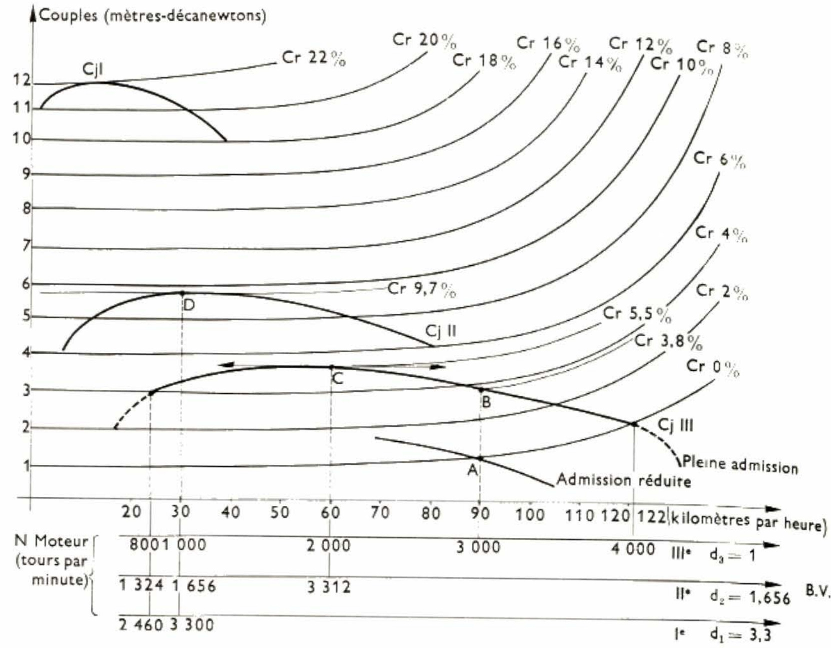


Fig. XVI-2

Comparaison entre les couples disponibles aux roues et le couple résistant

lent et une grosse cylindrée, caractéristiques qui, seules, permettraient de se passer d'une boîte de vitesses. Aux États-Unis d'Amérique, où les voitures présentent des puissances spécifiques élevées voisines de 150 ch/t (110 kW/t) et des moteurs de grosse cylindrée à régime de rotation relativement faible (4 000 à 4 500 tr/mn), les boîtes de vitesses offrent en général seulement trois rapports. En Europe, où les moteurs atteignent des régimes beaucoup plus élevés (7 000 à 8 000 tr/mn), avec des puissances proches de 60 à 80 ch/t (44 à 59 kW/t), on trouve couramment quatre à cinq rapports.

Pour une boîte à trois rapports, si nous représentons sur le même graphique (fig. XVI-2) le couple moteur à la jante *Cj* et les couples résistants correspondant à des pentes croissantes, nous allons pouvoir démontrer graphiquement le rôle et la nécessité de la boîte de vitesses. Nous porterons en abscisses la vitesse du véhicule en kilomètres par heure, et en ordonnées les moments des couples en mètres-décanewtons. Nous indiquerons les courbes représentatives des couples résistants par *Cr* 0 % à *Cr* 22 % pour les pentes comprises entre 0 % et 22 %.

Les couples moteurs disponibles à la jante dans les premier, deuxième et troisième rapports sont matérialisés par les courbes Cj_{I}, Cj_{II}, Cj_{III}.

En troisième vitesse, à pleine admission, le véhicule peut atteindre la vitesse théorique de 122 km/h en palier. À 90 km/h, le couple moteur nécessaire pour vaincre le couple résistant à la jante correspond à une admission réduite au point figuratif *A*.

Si la pente augmente, nous pourrons, en accélérant davantage, conserver cette vitesse jusqu'à ce que le point figuratif soit *B* ; il correspond à la courbe de pleine admission pour une pente de 3,8 %.

Si la pente augmente et toujours à pleine admission, le point figuratif se déplacera de *B* en *C* sur la courbe de couple mais la vitesse passera de 90 à 60 km/h avec une pente de 5,5 %. Le point *C* correspond au maximum du moment du couple disponible à la jante.

Si la vitesse diminue encore ou si la pente augmente, nous aurons dépassé les possibilités d'adaptation du moteur. Il faudra passer sur le deuxième rapport (courbe Cj_{II}) ; il sera alors possible de gravir une pente de 9,7 % à 30 km/h.

De la même façon, sur le premier rapport, nous pourrions gravir une pente de 22 % à 13 km/h environ.

Nous noterons l'allure exponentielle des courbes du couple résistant à la jante qui tient compte de la résistance de l'air.

1.3. Qualités d'une boîte de vitesses

1.3.1. Adaptation. — Une boîte de vitesses doit être adaptée de façon étroite à un véhicule et à un moteur déterminés, en particulier à la courbe de couple de ce dernier.

Plus le moteur a des caractéristiques « pointues », c'est-à-dire plus son maximum de couple se situe dans une faible plage de vitesses de rotation, plus la boîte devra présenter de possibilités d'utiliser le moteur dans cette gamme de vitesses.

En d'autres termes, le nombre de rapports de la boîte de vitesses devra être d'autant plus grand que la courbe de couple sera moins étalée autour de son maximum et que ce maximum sera situé plus haut par rapport à la vitesse de rotation maximale.

Malheureusement, le nombre de rapports ne peut guère croître à l'infini pour des raisons d'encombrement et de prix, et aussi par l'impossibilité où serait le conducteur de toujours choisir la meilleure combinaison.

Nous verrons que les boîtes automatiques et les boîtes continues présentent à cet égard des qualités précieuses.

1.3.2. Rendement. — Le rendement d'une boîte varie en général comme l'inverse de la démultiplication. Toutes choses égales par ailleurs, ce rendement est également conditionné par :

— le choix des dentures : les dentures hélicoïdales ont un rendement inférieur à celui des dentures droites ;

— le taux de travail des engrenages ;

— la flexion et le guidage des arbres.

1.3.3. Silence de fonctionnement. — Cette qualité dépend, à peu de chose près, des mêmes facteurs qui agissent sur le rendement.

1.3.4. Facilité de manœuvre. — Le passage des différentes combinaisons doit être rapide et facile. Nous verrons, en leur temps, les aménagements et les réalisations qui permettent au conducteur d'être déchargé en partie ou en totalité de la sujétion que représentent le choix de la combinaison et la manœuvre correspondante.

1.3.5. Sécurité de fonctionnement. — Elle doit se réaliser sur deux plans différents :

— la combinaison, une fois enclenchée, ne doit pas se désengager ;

— il ne doit pas être possible d'engager simultanément deux rapports différents. Cette manœuvre provoquerait le blocage de la transmission, avec danger de dérapage et de détériorations mécaniques importantes.

2. TRANSMISSIONS DISCONTINUES

2.1. Boîtes de vitesses à engrenages

2.1.1. Principe de réalisation. — Dans son principe, une boîte de vitesses est constituée par :

— Un arbre d'entrée, appelé arbre primaire, qui porte généralement à son extrémité située du côté moteur et sur une partie cannelée le disque du système d'embrayage. Cet arbre tourne constamment à la vitesse du moteur, sauf au débrayage.

— Un arbre de sortie ou arbre secondaire, parallèle au premier ou dans son prolongement, et relié constamment aux roues motrices par l'arbre de transmission, le renvoi d'angle et les demi-arbres.

— Dans le cas où l'arbre secondaire est dans le prolongement de l'arbre primaire, il existe un arbre intermédiaire parallèle et généralement au-dessous des deux premiers. Il est relié à l'arbre primaire ou à l'arbre secondaire par un train d'engrenages, appelé « prise constante ». Dans ce type de boîtes qui est, de beaucoup, le plus employé, l'arbre primaire peut être solidarisé par « crabotage » sur l'arbre secondaire, en réalisant la « prise directe ». Les deux arbres tournant à la même vitesse, le mouvement est transmis sans recourir à des trains d'engrenages et donc dans les meilleures conditions de silence et de rendement.

— Un arbre de renvoi ou de marche arrière.

— Un carter en fonte ou en alliage léger, solidement entretoisé et nervuré, qui sert de support aux arbres par l'intermédiaire de roulements et contient la réserve d'huile de graissage.

— Un couvercle renfermant le système de passage des différentes combinaisons ainsi que les dispositifs de verrouillage et de sécurité.

— Des paires de trains d'engrenages ménageant les rapports étagés nécessaires à l'adaptation du couple moteur au couple résistant.

— Des systèmes de solidarisation de certains pignons entre eux ou aux arbres sur lesquels ils tourillonnent.

— Éventuellement, des systèmes destinés à faciliter l'engagement des différents rapports et appelés « dispositifs de synchronisation » ou « synchroniseurs ».

De plus, certaines boîtes peuvent comporter des prises de mouvement, par exemple, pour un treuil ou une pompe. Cette prise de mouvement s'effectue à partir de l'arbre secondaire de la boîte de vitesses. En général, aucune autre combinaison n'est engagée en même temps que la prise de mouvement.

2.1.2. Différents types de boîtes de vitesses à engrenages

1° *Boîtes à engrenages à dentures droites.* — L'enclenchement des différentes combinaisons se fait par déplacement de *baladeurs*. Un pignon ou un train de pignons est dit baladeur lorsqu'il peut se déplacer dans des cannelures usinées dans l'arbre porteur. Le mouvement de translation du baladeur est obtenu à partir d'une fourchette portée par un coulisseau, qui se déplace dans un alésage ménagé dans le couvercle ou dans le carter de la boîte. Le conducteur agit sur les coulisseaux, soit par l'intermédiaire de tringleries, soit directement au moyen du levier de vitesses. La fourchette s'engage dans une gorge portée par le baladeur. Sur ses faces latérales, elle comporte des portées cémentées, parfaitement polies, qui permettent la rotation du baladeur sans frottements appréciables par rapport à la fourchette du fait du graissage par barbotage dans la réserve d'huile contenue dans le carter.

a) *Boîte à baladeur unique* (fig. XVI-3). — Dans ce système, qui n'est plus employé et n'est cité qu'à titre documentaire, le baladeur comprenait un nombre de pignons égal à celui du nombre de combinaisons.

b) *Boîte à baladeurs multiples*

— *Boîte à deux arbres sans prise directe.* La figure XVI-4 donne le schéma d'une boîte à quatre combinaisons avant et à deux trains baladeurs.

— *Boîte à trois arbres avec prise directe.* Le système le plus employé est celui donné par la figure XVI-5. Il a équipé

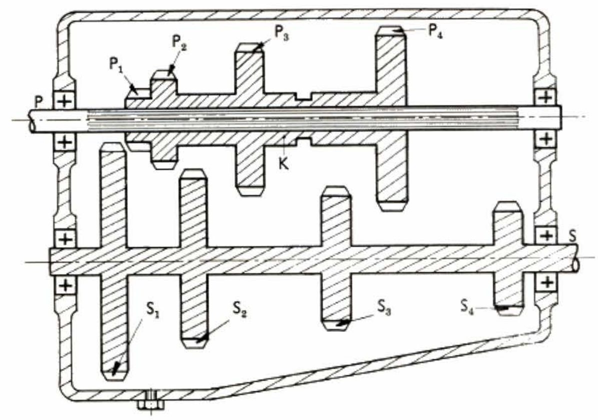


Fig. XVI-3 — Boîte de vitesses à baladeur unique
P : arbre primaire ; S : arbre secondaire ; P_1, P_2, P_3, P_4 : pignons primaires ; S_1, S_2, S_3, S_4 : pignons secondaires ; K : baladeur

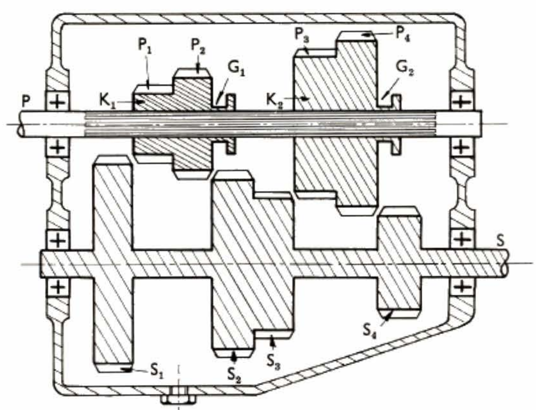


Fig. XVI-4 — Boîte de vitesses à baladeurs multiples (K_1 et K_2)

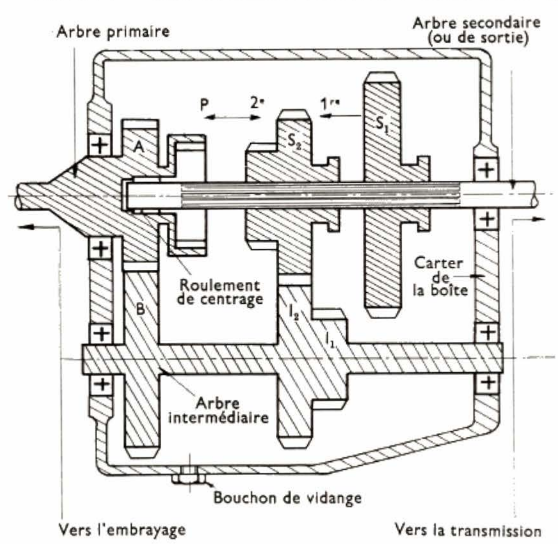


Fig. XVI-5 — Boîte de vitesses à prise constante avant (3 vitesses)
I_1, I_2 : pignons de l'arbre intermédiaire ; A, B : pignons de la prise constante

la plus grande partie des véhicules à moteur avant et roues motrices arrière aux débuts de l'automobile.

Certaines réalisations ont utilisé une prise constante arrière, avec la disposition de la figure XVI-6 (page suivante). Ce système n'est pratiquement plus employé et offrait un double inconvénient : absence de graissage de la boîte à l'arrêt du véhicule, échauffement de l'huile en fonctionnement.

2° *Boîtes à engrenages à taille hélicoïdale*

a) *Généralités.* — Les boîtes étudiées jusqu'ici étaient uniquement équipées d'engrenages à dentures

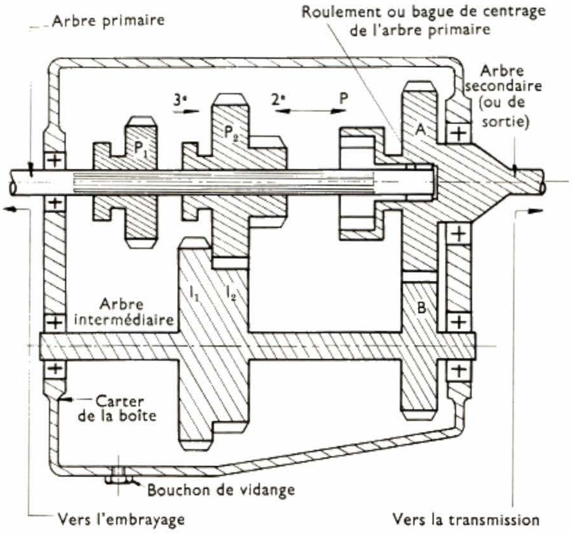


Fig. XVI-6 — Boite de vitesses à prise constante arrière (3 vitesses)

droites. En d'autres termes, les dents des pignons avaient un profil parallèle à l'axe de rotation du pignon. Ces pignons ont l'avantage d'avoir un bon rendement et surtout de ne pas créer de poussée latérale quand ils transmettent le mouvement. De plus, moyennant un biseautage latéral des dentures, relativement simple, qui réalise une *entrée de dents*, il est facile de les manœuvrer par simple coulissement sur l'arbre. Toutefois, ce genre de dentures donne un engrènement d'autant plus bruyant que la vitesse circonférentielle est plus grande et que la charge par unité de surface de la dent est plus importante. C'est pourquoi on a cherché à utiliser les avantages donnés par les dentures à taille hélicoïdale.

Nous pouvons admettre qu'un engrenage à taille hélicoïdale est constitué par une série d'engrenages de même taille et de même module, très minces, empilés côte à côte sur le même axe, chacun étant décalé par rapport au voisin d'un angle déterminé. À la limite un contact continu est réalisé : il correspond au roulement sans glissement des deux cercles primitifs. Le rendement de ces engrenages est inférieur à celui de leurs homologues à taille droite et il diminue au fur et à mesure que l'inclinaison de la dent augmente. Les angles d'inclinaison les plus généralement utilisés sont compris entre 27 et 30°. Ces engrenages ne peuvent se mettre en prise par coulissement et, de plus, ils offrent l'inconvénient d'exercer des poussées latérales importantes. C'est là la raison la plus importante qui nécessite pour ces boîtes des trains de pignons toujours en prise et la mise en œuvre des différentes combinaisons par des crabots analogues à ceux déjà rencontrés dans la prise directe des boîtes à baladeurs ordinaires. Nous pouvons donc considérer qu'en plus de la prise constante reliant l'arbre primaire et l'arbre intermédiaire, ces boîtes présentent un nombre de prises constantes égal au nombre de combinaisons à réaliser.

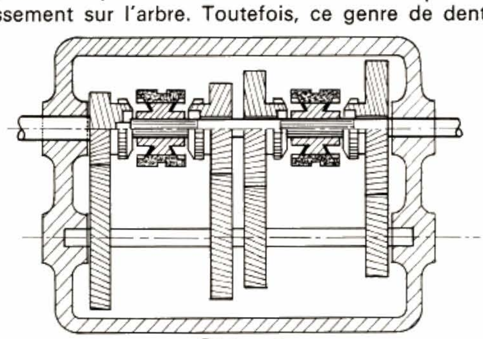
Parfois, un système mixte est employé, où les combinaisons inférieures restent à taille droite. Elles ne servent que pendant la période de démarrage, et leur manque de silence ne constitue qu'un défaut mineur.

Dans les réalisations soignées, toutes les combinaisons sont à taille silencieuse, sauf la marche arrière. La figure XVI-7 montre la réalisation d'une boîte à quatre combinaisons silencieuses de marche avant. Toutes les poussées latérales doivent être absorbées par construction, ce qui nécessite un usinage très soigné et très précis de la boîte. Une telle boîte est donc beaucoup plus coûteuse et moins robuste qu'une boîte à denture droite.

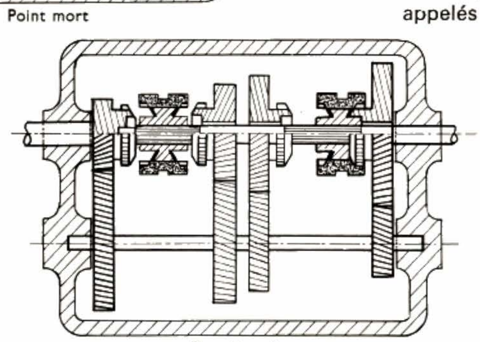
Malgré tous les défauts signalés de ces engrenages, ils sont aujourd'hui uniformément employés dans les boîtes modernes car, en plus du fonctionnement silencieux, l'artifice des prises constantes multiples permet de réaliser des systèmes de synchronisation, sans pour autant rendre insupportable le bruit de fonctionnement.

b) *Dispositifs de synchronisation*

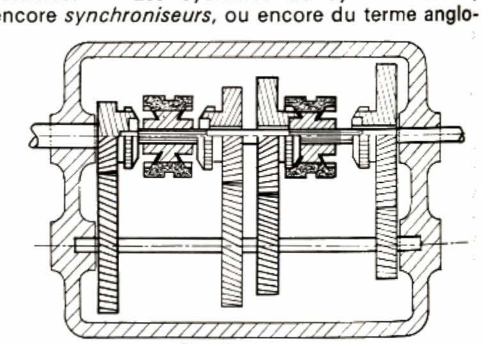
— *Généralités*. — Les systèmes de synchronisation, appelés encore *synchroniseurs*, ou encore du terme anglo-



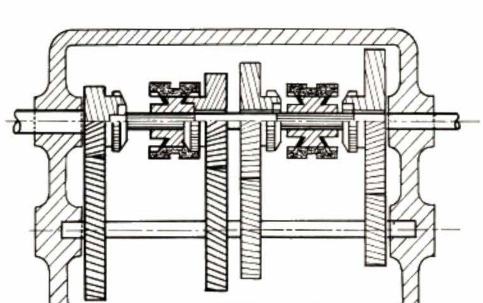
Point mort



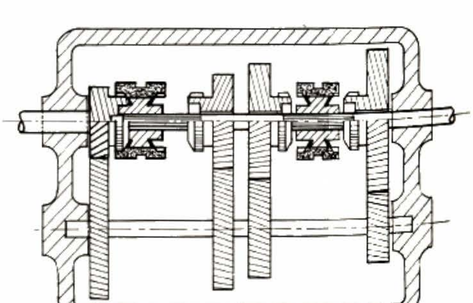
Première vitesse



Deuxième vitesse



Troisième vitesse



Prise directe

Fig. XVI-7

Boite silencieuse et synchronisée à prise avant, schémas de fonctionnement

saxon *synchromesh*, apportent une grande facilité de manœuvre pour le passage des différents rapports. Dans une boîte à engrenages à taille droite, l'engagement d'une combinaison n'est possible (sauf bruit important, à-coups ou risque de rupture des dentures) que si les dentures ont la même vitesse circonférentielle.

À la montée des combinaisons, en théorie, il suffit, de marquer un temps d'arrêt au point mort en lâchant l'accélérateur pour permettre à l'arbre intermédiaire de diminuer suffisamment sa vitesse avant d'exécuter l'engagement de la combinaison supérieure. À la descente des vitesses, au contraire, il faut accélérer cet arbre pour assurer l'égalisation des vitesses circonférentielles. En pratique, la combinaison de vitesses et le moment du passage doivent être choisis de telle façon que la vitesse du véhicule soit supérieure à la vitesse minimale permise par la nouvelle combinaison pour la montée et inférieure à la vitesse maximale permise par la nouvelle combinaison pour la descente. Les conducteurs des premières automobiles devaient effectuer les manœuvres dites de « double débrayage », ou encore de « double pédalage » qui, avec beaucoup d'habitude, un peu de temps (et un peu de chance) permettaient une conduite relativement discrète. Elle consistait à dégager la combinaison en prise, en débrayant pour passer au point mort, à réembrayer en accélérant, à débrayer de nouveau en lâchant l'accélérateur pour passer la combinaison inférieure, à réembrayer sur cette combinaison en accélérant.

Dans les boîtes dites synchronisées, la tâche du conducteur est grandement facilitée, en même temps que le temps nécessaire à la manœuvre est diminué de façon appréciable par un dispositif qui tend à égaliser les vitesses respectives des deux pignons à solidariser avant que l'engagement effectif ne se produise. Ces dispositifs sont toujours employés sur des boîtes à prises constantes multiples dans lesquelles il n'y a pas coulissement des pignons eux-mêmes mais déplacement d'un crabot qui solidarise l'engrenage sur l'arbre. Au début de l'apparition des synchroniseurs, seules les combinaisons supérieures étaient synchronisées. La tendance actuelle est d'en doter toutes les combinaisons de marche avant.

— *Réalisation.* — Le dispositif est, dans son principe, constitué par un petit embrayage à cône monté dans la partie centrale du crabot (fig. XVI-8). Le déplacement du synchroniseur s'effectue sous la poussée d'une fourchette agissant dans la gorge *M*, par exemple, vers la droite. Le moyeu intérieur du synchroniseur se déplace dans un premier temps sur les cannelures de l'arbre porteur *P*, par suite du verrouillage réalisé entre les pièces *A* et *B* par les billes *G*. Ce déplacement est matérialisé par la cote *b* sur le dessin, et suffit à engager les deux cônes C'_1 et C'_2 dont le frottement égalise les vitesses de D_1 et D'_2.

Quand l'égalisation des vitesses est obtenue, il devient possible de réaliser la seconde partie du mouvement matérialisé par la flèche *a*. Le crabot extérieur *B* se déplace par rapport à *A* sur lequel il est monté au moyen de cannelures. Les billes *G* s'effacent et le crabot solidarise D_1 et D'_2.

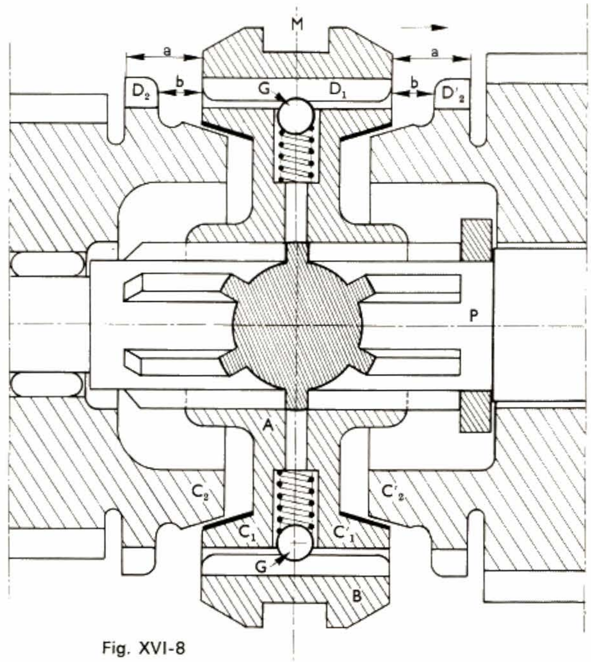


Fig. XVI-8

Dans la pratique, ce système offre un double désavantage. Tout d'abord, il suffit d'exercer une poussée assez forte sur le levier pour que le deuxième mouvement soit exécuté avant l'égalisation des vitesses. Ensuite, il est difficile de passer une vitesse à l'arrêt malgré l'usinage d'entrées de dents sur les crabots et il faut procéder à un réembrayage léger pour obtenir une rotation respective des pignons.

— *Synchroniseur Spicer* (fig. XVI-9). — Ces deux difficultés sont résolues par l'emploi de verrous qui ne s'effacent que lorsque l'égalisation des vitesses est obtenue ou en utilisant des embrayages à cônes libres qui autorisent une légère rotation par rapport à l'arbre.

Le craboteur *B* peut coulisser sur les cannelures du moyeu synchroniseur *A* qui est solidaire, par cannelures également, de l'arbre porteur mais sans déplacement latéral. Il porte une gorge extérieure où s'engage la fourchette de commande.

Le moyeu synchroniseur porte, à sa partie extérieure, trois rainures à 120° dans lesquelles sont logés trois verrous à ergot en bronze, poussés vers le craboteur par deux ressorts annulaires genre « circlips ». Les tétons s'engagent dans la position du point mort dans une rainure cylindrique intérieure du craboteur. Deux bagues-synchro *S* représentent la partie femelle de l'embrayage à cônes. Elles sont pourvues d'une denture extérieure correspondant à la denture intérieure du craboteur et à celle extérieure des pignons de crabotage, par exemple C_1.

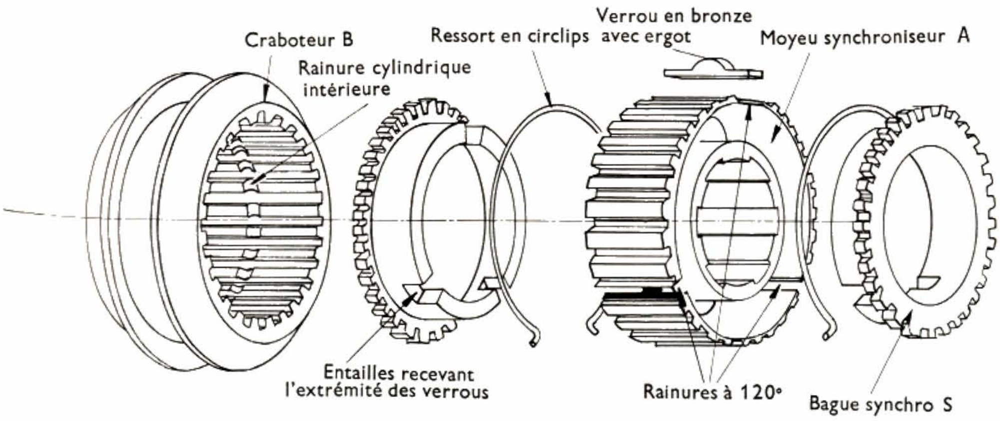


Fig. XVI-9

Synchroniseur à cônes (solution « Spicer ») : vue éclatée

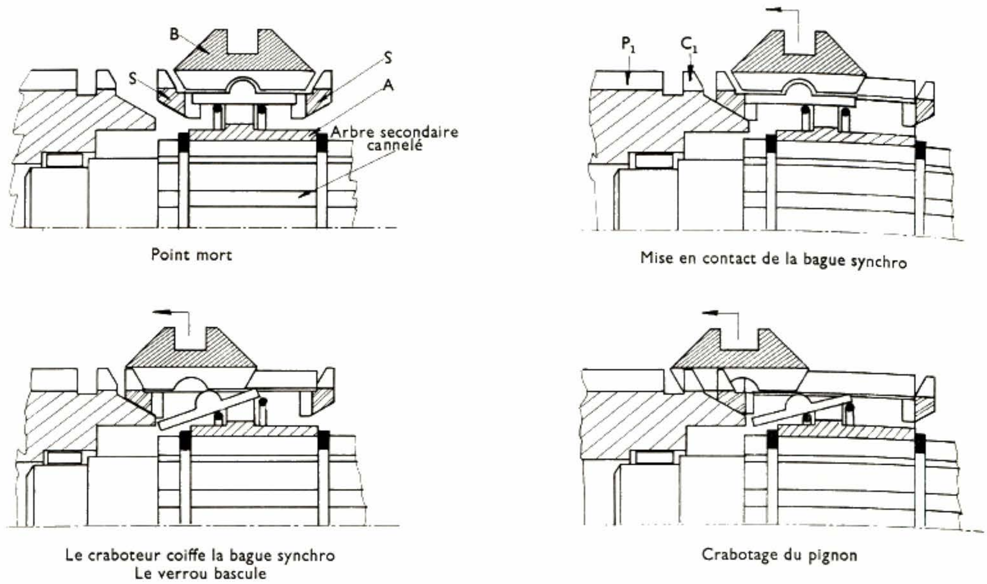


Fig. XVI-10

Schémas de fonctionnement du synchroniseur

Du côté opposé à la denture, chaque bague comporte trois entailles dans chacune desquelles s'engage l'extrémité d'un verrou.

La figure XVI-10 montre les quatre phases de fonctionnement :

● Point mort : les verrous maintiennent le craboteur centré sur le moyeu ; les bagues-synchro restent placées symétriquement par rapport au craboteur par un dispositif non figuré dans ce schéma.

● Au moment de l'engagement de la combinaison, le craboteur est poussé par la fourchette vers le pignon de prise constante P_1 ; l'ensemble bagues-synchro, verrous, craboteur se déplace latéralement par rapport au moyeu, et la bague-synchro vient en contact avec le cône mâle du pignon P_1.

L'entraînement en rotation de la bague *S* est assuré par les verrous à partir des rainures du moyeu. L'égalisation des vitesses est réalisée par l'embrayage de la bague-synchro sur le cône du pignon P_1 ; le couple nécessaire à ce mouvement provoque un appui des verrous dans les rainures qui s'oppose à la compression des circlips et à la libération des craboteurs. Celles-ci n'ont lieu que lorsque l'égalisation des vitesses est près d'être obtenue. Le verrou bascule et dégage le craboteur qui vient coiffer d'abord les dentures de la bague-synchro, puis celles du pignon craboteur C_1.

3° *Système d'inversion de marche.* — Le Code de la route impose que tout véhicule pesant plus de 350 kg soit muni d'un dispositif de marche arrière. Dans son principe, l'obtention de la marche arrière se borne à interposer dans la combinaison la plus démultipliée un pignon ou un train de pignons, de façon à réaliser une inversion avec une démultiplication au moins égale à celle de la première vitesse. C'est par le procédé de mise en prise des pignons ou du train d'inversion que nous pouvons classer les différents systèmes de marche arrière.

a) *Par pignon basculant* (fig. XVI-11). — Ce procédé, employé tout au début de l'automobile, n'est plus utilisé actuellement et n'est cité qu'à titre documentaire. Il offrait de grandes analogies avec le système décrit ci-après.

b) *Par pignon coulissant* (fig. XVI-12). — Un pignon de grande largeur est monté fou sur un arbre auxiliaire, parallèle aux autres arbres de la boîte. Il peut coulisser pour venir se mettre en prise avec les deux engrenages qui constituent le train de première vitesse. Ces deux engrenages sont maintenus dans leur position de point mort et ne sont donc pas en prise l'un avec l'autre. L'inversion est réalisée avec la même démultiplication que celle obtenue en première vitesse, le nombre de dents du pignon inverseur n'intervenant pas. Il faut un coulisseau spécial à la marche arrière, les autres coulisseaux étant dans leur position de point mort.

c) *Par pignon inverseur fixe* (V. fig. XVI-13). — Il n'y a que peu de différence par rapport à la réalisation précédente. Le pignon d'inversion n'a plus de mouvement de translation ; il est toujours en prise avec un pignon supplémentaire de l'arbre intermédiaire ; le diamètre de ce pignon est plus faible que celui du train de la première vitesse. Le pignon de première vitesse de l'arbre secondaire peut être manœuvré pour venir engrener, soit avec le pignon normal de première, soit avec le pignon d'inversion. Ce système est généralement utilisé dans les boîtes à trois combinaisons de marche avant avec deux coulisseaux. La démultiplication obtenue est plus faible que celle obtenue pour la première vitesse.

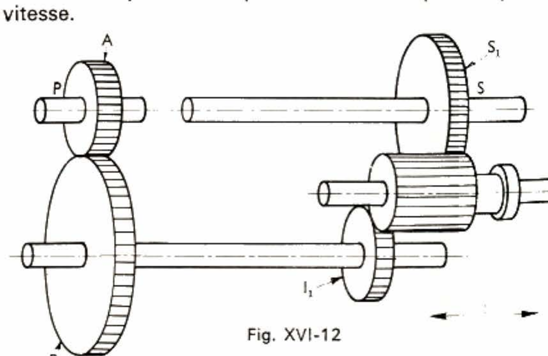
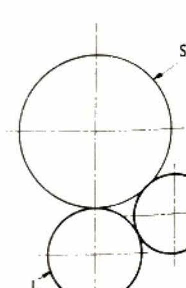


Fig. XVI-12

Système à pignon coulissant



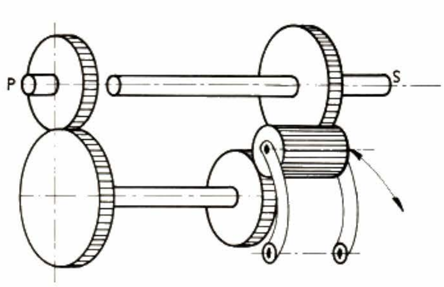
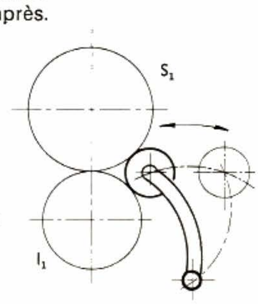


Fig. XVI-11

Système à pignon basculant



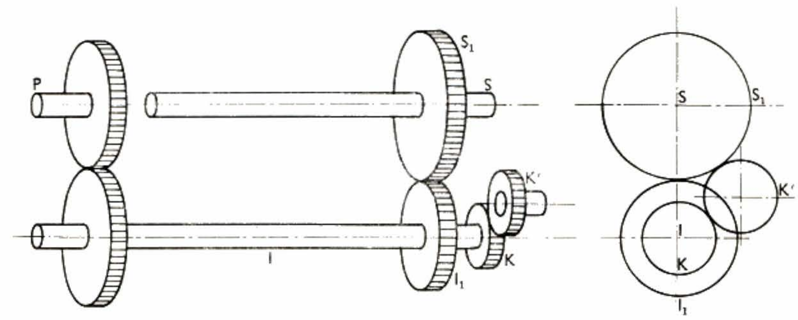


Fig. XVI-13

K, K' : train d'inversion

d) *Par bloc baladeur à deux pignons* (fig. XVI-14). — Ce système a beaucoup d'analogies avec celui décrit pour le pignon simple coulissant. L'arbre auxiliaire occupe toutefois une position un peu différente pour réaliser l'engrènement avec, d'une part, le pignon de première vitesse de l'arbre intermédiaire et, d'autre part, le pignon de première

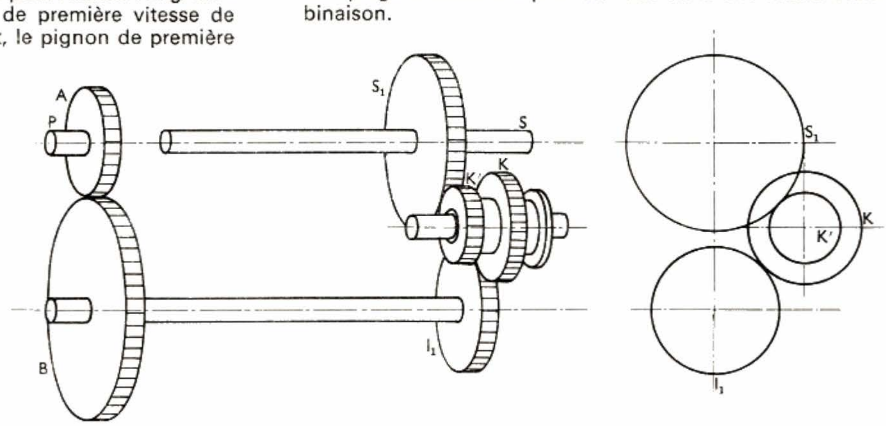


Fig. XVI-14

Bloc auxiliaire à deux pignons coulissants

vitesse de l'arbre secondaire. Ce dernier occupe la position de point mort.

4° *Système de surmultiplication.* — Dans un certain nombre de modèles, construits tant à l'étranger qu'en France entre 1930 et 1960, la tendance s'était établie de disposer d'une surmultiplication dans la boîte. Celle-ci était réalisée soit en aménageant la boîte pour disposer d'un rapport total plus grand que l'unité, la prise directe étant le rapport de troisième vitesse, soit encore en interposant entre l'arbre secondaire et l'arbre de transmission une seconde boîte située en aval de la première dans la chaîne cinématique, et permettant une multiplication de la vitesse de l'arbre secondaire. En théorie, par ce dispositif, on aurait pu doubler le nombre de combinaisons de la boîte primaire ; en réalité, la surmultiplication ne pouvait intervenir qu'après le passage de la boîte de vitesses dans sa combinaison de prise directe et ne donnait qu'une combinaison supplémentaire. Ce système était connu sous le nom d'*over-drive*, et était souvent à commande semi-automatique.

Cette tendance a maintenant disparu ; on s'est aperçu assez rapidement de l'anomalie qui consistait à accélérer l'arbre de transmission par rapport au moteur pour être finalement obligé de réaliser ensuite une démultiplication plus importante entre cet arbre et les roues. Le rendement étant inversement proportionnel à la démultiplication finale réalisée, et celui du surmultiplicateur n'étant pas égal à l'unité, on perdait finalement de la puissance tout en créant des problèmes d'équilibrage de l'arbre de transmission. En contrepartie, on gagnait sur la vitesse de rotation du moteur, on limitait l'usure et on réalisait une économie de carburant non négligeable.

Cependant ce système retrouve, sous une forme un peu différente, une certaine faveur depuis le développement des autoroutes. Les longs trajets, à vitesse élevée, qu'elles permettent, ont reposé des problèmes de tenue mécanique et thermique des moteurs, en même temps que les aménagements des pentes et des virages rendaient moins fréquent le recours aux combinaisons intermédiaires de la boîte. Par ailleurs, les conducteurs répugnent moins à changer de vitesse qu'autrefois et ont compris que les « combinaisons longues » sont plus économiques à tous égards. Il faut ajouter que les moteurs ont gagné en puissance et ont des courbes de couple moins pointues et qui permettent donc une plage d'utilisation plus étendue dans une même combinaison.

5° *Réducteurs.* — Sur les poids lourds et aussi pour certains usages spéciaux (tracteurs, véhicules militaires ou forestiers tous terrains), le nombre de combinaisons d'une boîte de vitesses ordinaire peut être inférieur aux besoins. En effet, ces véhicules nécessitent soit des efforts à la jante très importants pour le remorquage ou pour gravir les pentes importantes, soit une très faible vitesse d'avancement pour aborder les difficultés d'un terrain difficile sans trop martyriser la suspension, la direction et le chargement. Un dispositif relativement simple est constitué par le réducteur ; analogue dans son principe au surmultiplicateur, il représente une seconde boîte de vitesses située en aval de la première dans la chaîne cinématique.

Cette boîte n'offre en général que deux combinaisons : une prise directe et une combinaison réduite.

On double ainsi le nombre des combinaisons fournies par la boîte. La conduite reste relativement simple : sur route le réducteur se trouve en prise directe et la boîte est utilisée de façon normale. En terrain difficile, on passe en vitesse réduite et la boîte normale est utilisée en fonction des difficultés du terrain.

Certains engins de combat (EBR Panhard) étaient équipés de deux boîtes à quatre combinaisons placées en série. Le conducteur pouvait exercer son choix entre seize combinaisons (4 × 4).

6° *Roue libre.* — Avant 1939, certaines voitures avaient été munies d'une roue libre. Généralement placé à la sortie de la boîte, cet organe permettait une désolidarisation de l'arbre de transmission par rapport à l'arbre secondaire de la boîte quand le conducteur cessait son action sur l'accélérateur. Le moteur n'étant plus entraîné par le véhicule consommait moins de carburant et moins d'huile de graissage. De plus, avec une boîte synchronisée, on pouvait se dispenser d'utiliser l'embrayage pour changer de vitesse. Cependant, du fait de la disparition du frein moteur, les freins étaient plus souvent sollicités et s'usaient davantage. Par ailleurs, un certain « doigté » était nécessaire pour éviter les à-coups à la reprise et le temps mort qui était inévitable pouvait présenter des risques, en particulier dans les virages. De plus, un dispositif de blocage était indis-

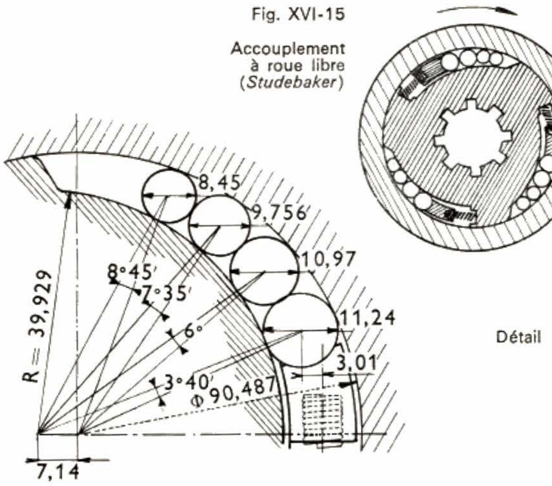


Fig. XVI-15

Accouplement à roue libre (*Studebaker*)

pensable pour la marche arrière. Les roues libres utilisées étaient des systèmes à galets réalisant un coincement entre deux séries de rampes portées par les cages (fig. XVI-15).

Pour remédier à certains des inconvénients constatés, un essai a été fait en introduisant la roue libre à l'intérieur du baladeur des troisième et quatrième combinaisons. On pouvait ainsi disposer du frein-moteur sur les combinaisons inférieures, ainsi que pour immobiliser le véhicule lors des stationnements en côte.

7° *Dispositifs de commande*

— *Principe.* Dans les boîtes à engrenages, le mouvement de translation des baladeurs, des crabots ou des synchroniseurs est obtenu par une commande mécanique ou parfois hydraulique (DS Citroën).

— *Commande mécanique.* — Pour chaque baladeur, cette commande comprend :

- une fourchette qui s'engage dans une gorge usinée dans le baladeur ;
- un coulisseau sur lequel est fixé le manchon de la fourchette et qui se déplace parallèlement au mouvement du baladeur dans des alésages pratiqués dans le couvercle de la boîte ou dans le carter. Parfois, la tringle est fixe ; c'est le manchon qui coulisse sur la tringle ;
- un levier de manœuvre, appelé levier de vitesses, qui est placé soit sous le volant, soit sur le tableau de bord, soit sur le plancher. Dans ce dernier cas, le levier peut être fixé directement sur le couvercle de la boîte de vitesses ;

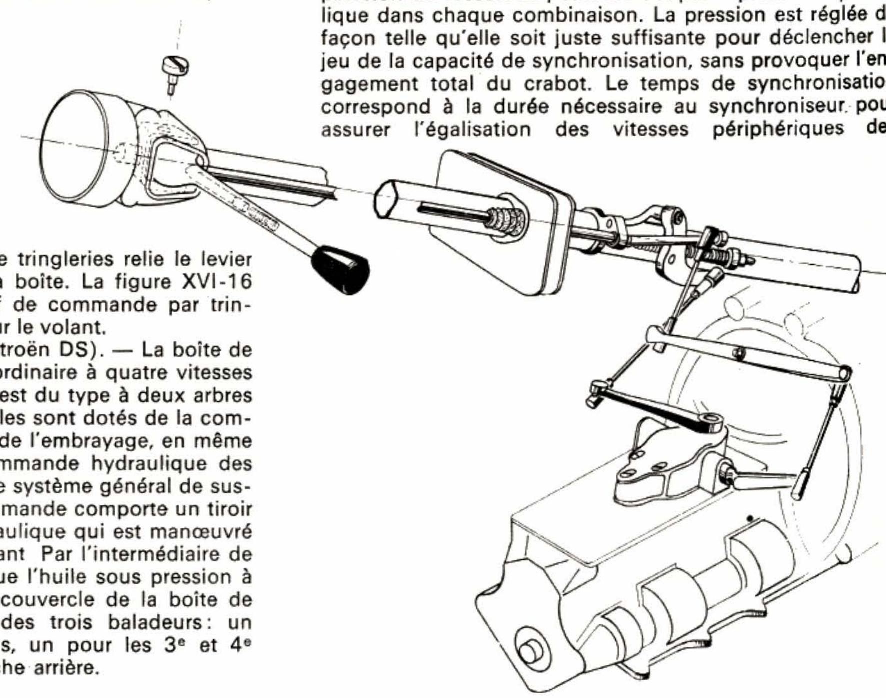


Fig. XVI-16

Commande à levier sous le volant

- un système de câbles ou de tringleries relie le levier de manœuvre aux organes de la boîte. La figure XVI-16 donne le schéma d'un dispositif de commande par tringleries à partir d'un levier placé sur le volant.

— *Commande hydraulique* (Citroën DS). — La boîte de vitesses de la DS est une boîte ordinaire à quatre vitesses avant et une marche arrière. Elle est du type à deux arbres sans prise directe. Certains modèles sont dotés de la commande hydraulique automatique de l'embrayage, en même temps que d'un système de commande hydraulique des vitesses. Alimentée en huile par le système général de suspension et de freinage, cette commande comporte un tiroir sélecteur situé dans le bloc hydraulique qui est manœuvré par un levier placé devant le volant Par l'intermédiaire de tuyauteries métalliques, il distribue l'huile sous pression à des cylindres contenus dans le couvercle de la boîte de vitesses, prolongeant l'alésage des trois baladeurs : un pour les 1re et 2e combinaisons, un pour les 3e et 4e combinaisons et un pour la marche arrière.

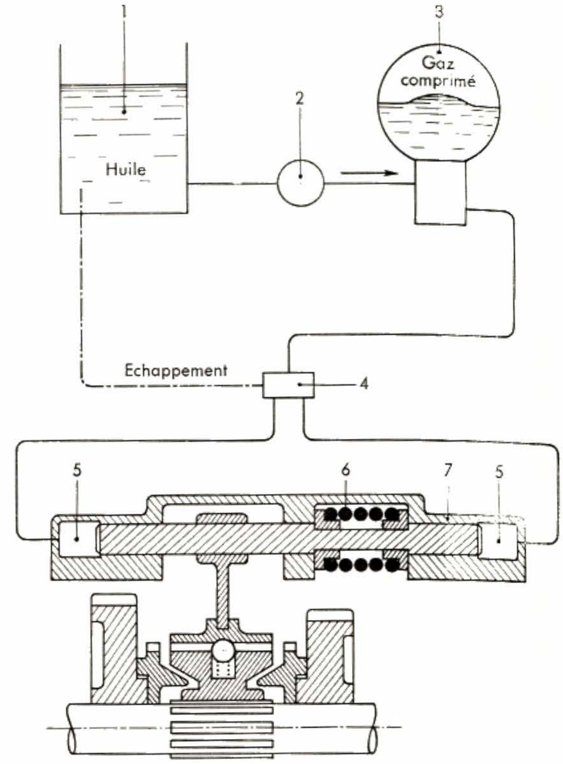


Fig. XVI-17 — Schéma de commande hydraulique (*Citroën* DS 19)

1. Réservoir
2. Pompe haute pression
3. Accumulateur hydraulique
4. Sélecteur
5. Cylindres de commande d'axe de fourchette
6. Ressort de rappel au point mort
7. Couvercle de boîte

La figure XVI-17 donne le schéma d'un des baladeurs et de ses cylindres de commande placés de part et d'autre de la tige du baladeur. Le rappel au point mort est obtenu par un ressort agissant à chacune de ses extrémités sur une coupelle. Dans la position de point mort, les deux coupelles s'appuient sur chacune des extrémités du logement.

Dès qu'une combinaison est engagée, l'épaulement de la tige du baladeur entraîne la coupelle qui comprime le ressort. La tige du baladeur n'est verrouillée que par la pression du ressort au point mort et par la pression hydraulique dans chaque combinaison. La pression est réglée de façon telle qu'elle soit juste suffisante pour déclencher le jeu de la capacité de synchronisation, sans provoquer l'engagement total du crabot. Le temps de synchronisation correspond à la durée nécessaire au synchroniseur pour assurer l'égalisation des vitesses périphériques des

pignons. Dès que l'action est terminée, dans l'accumulateur, la pression hydraulique s'accroît suffisamment pour assurer le crabotage complet. La pression continue alors à croître et agit sur un piston auxiliaire, « l'osselet », qui provoque le déplacement du tiroir automatique de changement de vitesses. Il existe un « osselet » par combinaison de vitesses.

Dès que la pression est supprimée, le ressort ramène le baladeur au point mort, à condition qu'il n'y ait pas d'appui sur les dentures du crabot qui empêche le mouvement. La manœuvre du sélecteur est réalisée de telle façon qu'elle entraîne toujours le débrayage automatique à chaque point mort hydraulique qui sépare les différentes positions de commande.

Le réembrayage se produit après une légère temporisation qui est due à une cavité de synchronisation et qui, de plus, peut varier légèrement avec la position de l'accélérateur agissant sur le correcteur de réembrayage.

Le dispositif est étudié pour que le démarreur ne puisse actionner le moteur que dans la position de point mort séparant les première et deuxième combinaisons. Cette sécurité évite le danger de la mise en route intempestive de la voiture avec une vitesse engagée. Il suffirait en effet d'un coup d'accélérateur inopportun ou de la mise en action du système de départ à froid pour faire jouer l'automaticité de l'embrayage.

8° *Verrouillage.* — Le dispositif de verrouillage a pour rôle d'empêcher les coulisseaux et, par conséquent, les baladeurs, de se déplacer de la position choisie par le conducteur. Le verrouillage a un double but :

— il doit empêcher qu'une combinaison de vitesses en prise puisse se dégager ;

— il doit surtout éviter qu'une combinaison quelconque puisse s'engager alors qu'une autre est déjà en prise. On distingue :

a) *Le verrouillage automatique*, constitué par une bille ou un bonhomme d'arrêt poussé par un ressort dans une encoche ménagée dans le coulisseau. Ce dernier comporte un nombre variable d'encoches suivant la constitution de la boîte de vitesses. Dans les systèmes à baladeurs multiples, il y a en général trois encoches, une pour le point mort et une pour chacune des combinaisons. Les engrenages droits n'ont, en général, aucune poussée latérale sauf après un service assez long où l'usure des dents en biseau et l'affaiblissement du verrouillage peuvent entraîner le désagrément des vitesses « qui sautent ». Quand la boîte est en bon état, les verrouillages peuvent assurer l'immobilisation des pignons baladeurs ou des crabots sans que, par suite de la multiplication de l'effort dû au levier, le conducteur ait à effectuer un effort trop important.

b) *Le verrouillage positif*, qui a pour rôle d'empêcher la mise en œuvre simultanée de deux combinaisons différentes. Il n'intéresse donc que les boîtes à baladeurs multiples ayant au moins deux coulisseaux.

— *Le verrouillage à doigt.* — Il n'est employé que dans les boîtes à deux coulisseaux ; chacun des coulisseaux comporte une encoche supplémentaire *E* et *E'*. Un doigt de verrouillage est placé dans un alésage du couvercle de boîte, entre les deux coulisseaux ; sa longueur est égale à la distance qui sépare les deux tringles, augmentée de la profondeur d'une des encoches.

Dès qu'un coulisseau est déplacé, l'extrémité du doigt se trouve en face d'une partie pleine de la tringle correspondante. Le doigt est donc obligatoirement engagé dans l'encoche de l'autre tringle qu'il verrouille. La portée des doigts en contact avec les tringles est calculée pour que le verrouillage s'efface de lui-même dès que la tringle est

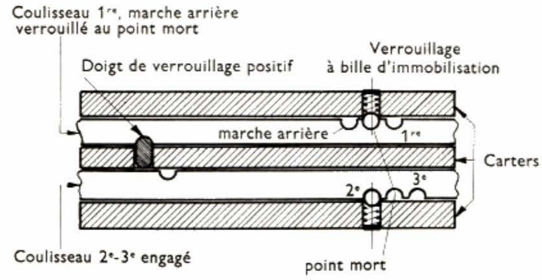


Fig. XVI-18 — Verrouillage à doigt

manœuvrée, sous réserve bien entendu que l'autre extrémité du doigt se trouve devant une encoche de l'autre tringle. La figure XVI-18 donne la disposition respective des doigts et des tringles dans les différentes positions de point mort et de combinaison engagée.

— *Le verrouillage à billes.* — Ce système est employé dans les boîtes à trois coulisseaux. Chacune des tringles de coulisseaux extérieurs comporte une encoche. La tringle centrale porte deux encoches opposées, de même profondeur, et elle est traversée par un bonhomme suivant l'axe des deux encoches. La longueur de ce dernier est égale au diamètre de la tringle de coulisseau, diminuée de la profondeur d'une encoche. Deux billes sont logées dans des alésages cylindriques du couvercle. Leur diamètre est égal à la distance qui sépare les parties cylindriques des tringles, augmentée de la profondeur d'une encoche. Le schéma (fig. XVI-19) donne la disposition des coulisseaux et des billes pour les déplacements successifs de chacune des tringles de coulisseaux. Dès que l'une des tringles est déplacée, les billes verrouillent automatiquement les autres tringles.

— *Le verrouillage à cadre ou à ancre.* — Les deux dispositifs relèvent du même principe et ne sont pratiquement plus employés. Les figures XVI-20 et XVI-21 (page suivante) en donnent une idée suffisante pour qu'une description détaillée soit superflue.

9° *Sécurités*

a) *Sécurité de sélection.* — Pour faciliter la manœuvre de la boîte, le doigt de commande qui manœuvre les coulisseaux ne peut se déplacer :

— perpendiculairement aux coulisseaux que dans la position de point mort ;

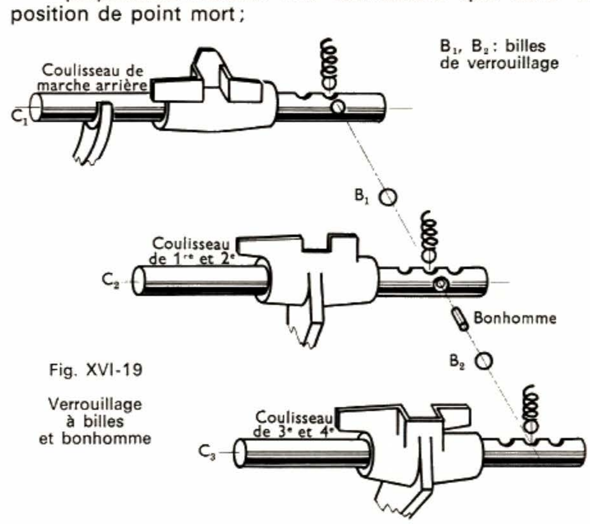
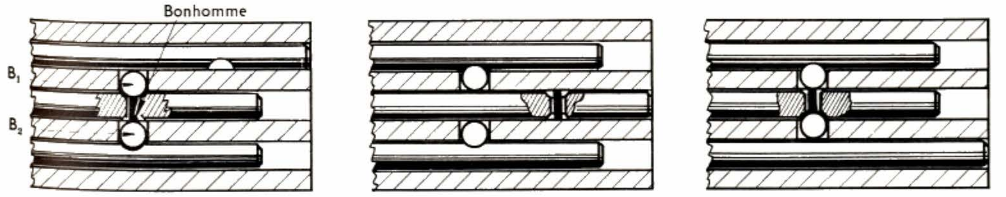


Fig. XVI-19

Verrouillage à billes et bonhomme

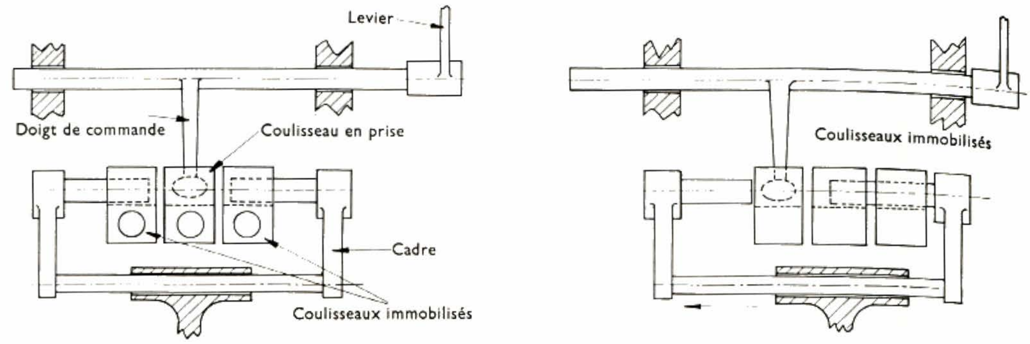


C_1 en fonctionnement C_2, C_3 bloqués

C_2 en fonctionnement C_1, C_3 bloqués

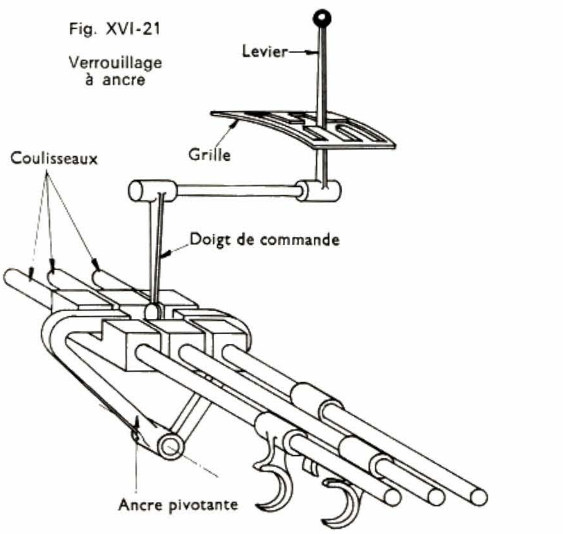
C_3 en fonctionnement C_1, C_2 bloqués

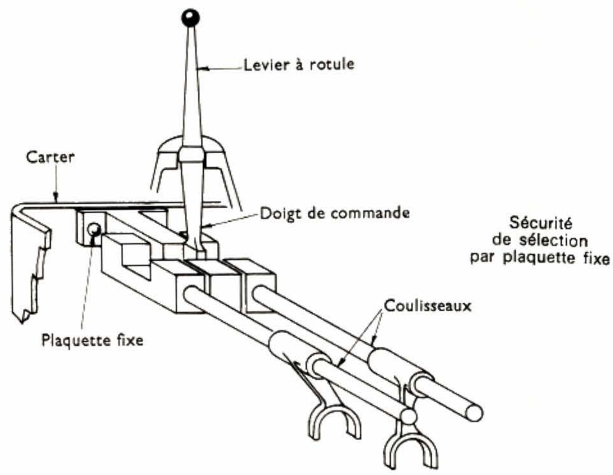
Fig. XVI-20
Verrouillage à cadre



Position de verrouillage

Fig. XVI-21
Verrouillage à ancre





— longitudinalement par rapport à ceux-ci que dans l'un quelconque des plans perpendiculaires au couvercle passant par l'axe du coulisseau.

Cette disposition a pour but d'empêcher la manœuvre simultanée de deux coulisseaux. Pour les boîtes à deux coulisseaux, la plaquette fixe est suffisante. Pour les boîtes à trois coulisseaux, on utilise souvent le système à grille.

Fig. XVI-22 — Sécurité de marche arrière : verrouillage effectif

a position verrouillée

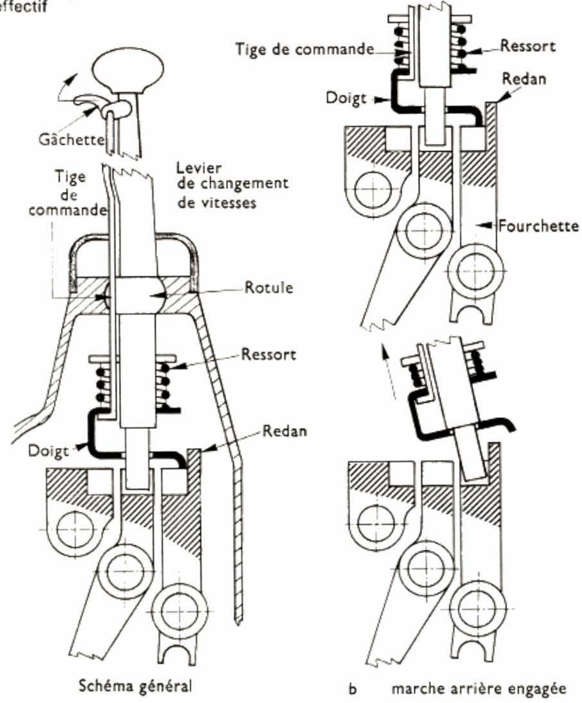


Schéma général

b marche arrière engagée

b) *Sécurité de marche arrière.* — Ce système a pour but d'éviter le passage intempestif de la boîte dans la combinaison de marche arrière. Si le véhicule roule en marche avant, une telle manœuvre peut occasionner une détérioration de la boîte ou un arrêt brutal du véhicule.

Même à l'arrêt, dans les encombrements, le conducteur peut être surpris par l'engagement de la marche arrière alors qu'il avait l'intention de passer la première vitesse. Deux dispositifs sont utilisés :

— *Le verrouillage effectif.* — Le doigt de commande comporte un verrou qui bloque son mouvement vers le coulisseau de marche arrière. Ce verrou est commandé à partir de la poignée du levier de vitesses par une tringlerie. Le passage en marche arrière nécessite donc une manœuvre supplémentaire (fig. XVI-22).

— *Le verrouillage relatif.* — Le doigt de commande comporte un plongeur poussé par un ressort dont il faut vaincre la résistance pour passer en marche arrière. Le conducteur a donc son attention attirée par l'effort supplémentaire nécessaire. Ces deux systèmes ne peuvent être employés que dans les boîtes où le coulisseau de marche arrière est indépendant de toute autre combinaison (fig. XVI-23).

10° *Calcul des démultiplications.* — Le rapport des fréquences de rotation n_1 et n_2 de deux engrenages P_1 et P_2, de diamètres primitifs D_1 et D_2, dont les nombres de dents sont respectivement N_1 et N_2, est égal au rapport inverse des diamètres primitifs ou au rapport inverse du nombre de dents. Nous pouvons donc écrire :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

En supposant que le rendement d'un train d'engrenages soit égal à l'unité, la puissance est conservée ; les couples d'entrée T_1 et de sortie T_2 varient en sens inverse de la vitesse puisque la puissance est le produit du couple et de la vitesse angulaire $\left(\frac{2\pi n}{60}\right.$, si la fréquence de rotation n est

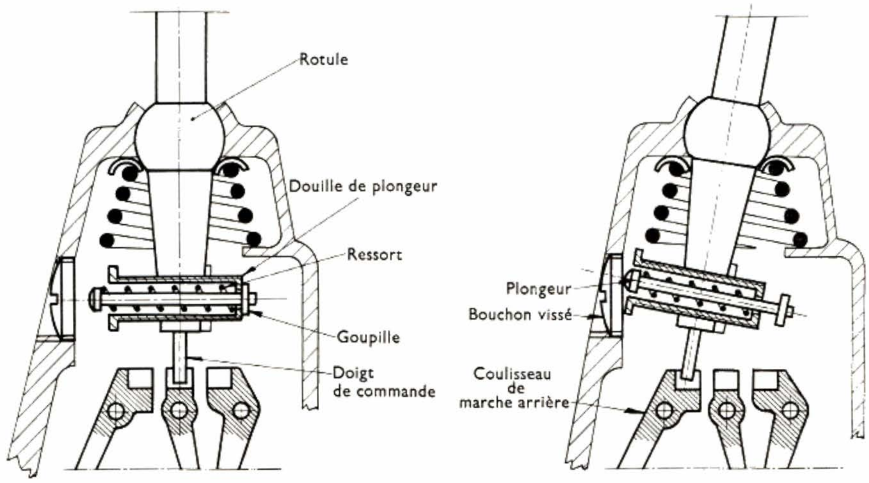


Fig. XVI-23

Verrouillage relatif

exprimée en tours par minute). L'équation fondamentale d'un train d'engrenages peut donc se mettre sous la forme suivante :

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Dans une boîte de vitesses ordinaire, nous avons vu que la prise constante entre l'arbre primaire et l'arbre intermédiaire introduisait une démultiplication voisine de 3/5 à 4/5.

Supposons une boîte à quatre vitesses dont les nombres de dents sont respectivement :

Prise constante { arbre primaire 20 dents / arbre intermédiaire 25 dents

	1re	2e	3e
Arbre intermédiaire	10 dents	17 dents	20 dents
Arbre secondaire	32 dents	25 dents	22 dents

Les démultiplications totales seront :

en 1re vitesse : $\frac{10}{32} \times \frac{20}{25} = 0{,}250$

en 2e vitesse : $\frac{17}{25} \times \frac{20}{25} = 0{,}544$

en 3e vitesse : $\frac{20}{22} \times \frac{20}{25} = 0{,}730$

en 4e vitesse : 1 (c'est la prise directe).

Nous donnons ci-après les démultiplications réalisées dans un certain nombre de boîtes de véhicules courants :

Combinaison	1	2	3	4	5	6	AR.
Renault R 6	0,263	0,500	0,732	0,965	—	—	0,263
Peugeot 404	0,250	0,446	0,693	1	—	—	0,231
Citroën GS	0,262	0,422	0,657	0,893	—	—	0,240
Citroën DS 21 injection	0,306	0,545	0,840	1,173	—	—	0,317
Alfa Romeo 1250	0,302	0,503	0,737	1	1,126	—	0,331
Chrysler 160	0,282	0,467	0,723	1	—	—	0,330
Peugeot 504	0,273	0,461	0,710	1	—	—	0,267
Berliet GL R8	0,151	0,257	0,411	0,645	1	1,410	0,176

2.2. Boîtes de vitesses à trains épicycloïdaux. — Les boîtes de vitesses à trains épicycloïdaux ont été employées fréquemment sur des véhicules américains des années 1920-1930. La célèbre Ford T avait une boîte à deux vitesses actionnée par des pédales. Entre les deux guerres mondiales, la boîte électromagnétique Cotal en France et la boîte présélective Wilson d'origine anglaise ont équipé de nombreux types de véhicules. Aux États-Unis d'Amérique des boîtes automatiques à trains épicycloïdaux sont apparues vers les années 1938-1940. Depuis 1934, les transmissions automatiques se sont largement répandues associées ou non à des transformateurs de couples ou à des embrayages hydrauliques.

2.2.1. Rappel de notions concernant les trains épicycloïdaux

1° *Généralités.* — Le terme épicycloïdal vient de la courbe plane ou sphérique décrite par un point d'une roue se déplaçant sans glisser sur un plan : cette courbe est une cycloïde. Si la roue se déplace sur un cercle, la courbe plane devient une épicycloïde ou une hypocycloïde, suivant que le contact est extérieur ou intérieur (V. t. 3, Dessin technique, chap. 2). Bien que le train simple décrit ci-dessous soit à la fois épicycloïdal et hypocycloïdal, l'usage a prévalu d'utiliser uniquement le premier qualificatif. Un train épicycloïdal est dit plan s'il ne comporte que des engrenages cylindriques. Il est dit sphérique si les engrenages sont coniques.

Un train épicycloïdal simple est constitué par un ensemble d'engrenages comprenant :

— un solaire ou planétaire, engrenage cylindrique conventionnel ;

— un porte-satellites (ayant au moins deux satellites) qui est centré sur le même axe que le planétaire ;

— une couronne dentée à denture intérieure également centrée sur l'axe du planétaire.

Les satellites engrènent extérieurement sur le planétaire et intérieurement avec la couronne (fig. XVI-24). Dans certains cas, le train peut être plus complexe et comporter deux solaires sans couronne intérieure. Les satellites sont alors formés d'un train de deux engrenages de diamètre généralement différent.

Ils présentent un ensemble de qualités précieuses :

— le rendement de ces trains est très élevé et varie de 95 % en réduction à 98 % en prise ;

— ils sont très silencieux par suite des portées importantes réalisées, et de l'absence de flexion des arbres ;

Train épicycloïdal

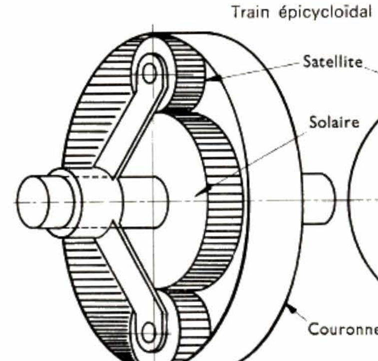


Fig. XVI-24

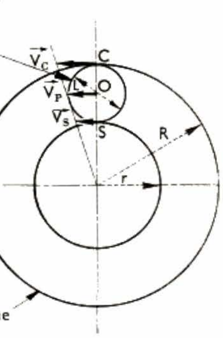


Fig. XVI-25

— ils forment des ensembles équilibrés, c'est-à-dire ne provoquant aucune réaction extérieure ;

— leur commande est très facile, celle-ci se bornant à l'immobilisation de l'un des éléments par rapport au carter pour la réduction ou l'inversion ; au crabotage, l'un des éléments est embrayé sur l'un quelconque des deux autres pour obtenir la prise directe.

2° *Rapports de vitesses des éléments.* — La relation de vitesse existant entre les trois éléments est connue sous le nom de loi de Willys. Elle peut s'établir très facilement en remarquant (V. fig. XVI-25) :

— que la vitesse linéaire V_P de l'axe O du satellite est toujours, en valeur algébrique, la demi-somme des vitesses linéaires V_S et V_C des points de contact S du satellite avec le planétaire et C du satellite avec la couronne par rapport au centre du train ;

— que le diamètre d du satellite est égal à la différence des rayons R de la couronne et r du planétaire.

En exprimant les vitesses angulaires en radians et en les appelant :

ω_P pour le porte-satellites,
ω_S pour le planétaire (ou solaire)
ω_C pour la couronne.

il vient :

$$V_P = \frac{V_S + V_C}{2}$$

$$V_S = \omega_S . r$$

$$V_C = \omega_C . R$$

Donc :

$$V_P = \frac{V_S + V_C}{2} = \frac{\omega_S . r + \omega_C . R}{2}$$

Mais, par ailleurs :

$$V_P = \omega_P \left(\frac{d}{2} + r\right) = \omega_P \left(\frac{R - r}{2} + r\right) = \omega_P \left(\frac{R + r}{2}\right)$$

Si nous égalons les deux valeurs obtenues pour V_P, nous obtenons :

$$\frac{\omega_S . r + \omega_C . R}{2} = \omega_P \left(\frac{R + r}{2}\right)$$

Soit encore :

$$\omega_S . r + \omega_C . R = \omega_P \, (R + r)$$

et :

$$\omega_P = \frac{\omega_S \, r + \omega_C \, R}{R + r}$$

Les nombres de dents n du planétaire et N de la couronne étant entre eux comme les rayons r et R, nous pouvons écrire :

$$\omega_P = \frac{\omega_S \, n + \omega_C \, N}{N + n}$$

Les principales combinaisons de vitesses du train épicycloïdal correspondent à :

$\omega_S = 0$ (planétaire bloqué),
$\omega_C = 0$ (couronne bloquée),
$\omega_P = 0$ (porte-satellites bloqué),
$\omega_S = \omega_C$ (crabotage de planétaire et de la couronne).

La formule donnant ω_0 se simplifie alors et devient :

— dans le 1er cas : $\omega_P = \dfrac{\omega_C \, N}{N + n}$

— dans le 2e cas : $\omega_P = \dfrac{\omega_S \, n}{N + n}$

— dans le 3e cas : $\omega_S \, n + \omega_C \, N = 0$

— dans le 4e cas : $\omega_P = \omega_S = \omega_C$ (prise directe).

Connaissant le nombre de dents des engrenages, il est donc facile de calculer le rapport de réduction :

— 1er cas : $\dfrac{\omega_P}{\omega_C} = \dfrac{N}{N + n}$ (train en réduction)

— 2e cas : $\dfrac{\omega_P}{\omega_S} = \dfrac{n}{N + n}$ (train en réduction)

— 3e cas : $\dfrac{\omega_S}{\omega_C} = -\dfrac{N}{n}$ (train en multiplication et inversion)

— 4e cas : $\dfrac{\omega_P}{\omega_S} = 1$ (prise directe)

Jusqu'ici nous n'avons considéré que le cas où l'un des organes était immobilisé par rapport au carter ou solidarisé avec l'un des deux autres éléments. Si nous nous reportons aux deux remarques préliminaires qui, au début de ce paragraphe, nous ont permis d'aboutir à la formule de Willys, nous pouvons maintenant envisager le cas où deux des éléments du train sont moteurs et animés de vitesses différentes. Le troisième élément étant le récepteur unique, le train épicycloïdal peut alors être considéré comme un organe susceptible de faire la somme ou la différence des deux mouvements d'entrée. Nous avons réalisé un « différentiel » dans le sens le plus large du terme. Les deux cas extrêmes seraient les suivants :

— les deux éléments d'entrée, couronne et planétaire pour fixer les idées, tournent dans le même sens à la même vitesse angulaire. Le mouvement du troisième élément a la même valeur en vitesse angulaire, c'est la prise directe ;

— les deux mêmes éléments ont la même vitesse angulaire mais de sens opposé. Le troisième élément est immobile.

Dans ces deux cas, en appelant :

ω_P la valeur *algébrique* de la vitesse angulaire du porte-satellites,

ω_C la valeur *algébrique* de la vitesse angulaire de la couronne,

ω_S la valeur *algébrique* de la vitesse angulaire du planétaire,

N le nombre de dents de la couronne,

n le nombre de dents du planétaire,

nous avons :

$$\omega_P = \frac{\omega_C . N + \omega_S . n}{N + n}$$

Si $\omega_C = -\omega_S$ nous avons bien $\omega_P = 0$

Si $\omega_C = \omega_S$ nous avons aussi $\omega_P = \omega_C = \omega_S$

Pour calculer les vitesses respectives des éléments dans tous les cas, il faut donner à la formule de Willys une expression plus générale :

$$\frac{\omega_C - \omega_P}{\omega_S - \omega_P} = -\frac{n}{N}$$

Nous retrouverons ce fonctionnement du train planétaire en différentiel dans quelques-unes des réalisations étudiées ci-après.

3° *Inconvénients des trains épicycloïdaux*

a) *Limitation du rapport de réduction.* — Nous avons vu que les diamètres primitifs des trois éléments composant un train épicycloïdal étaient liés par la relation :

$$D_C = D_S + 2D_0$$

où D_C est le diamètre de la couronne,
D_S est le diamètre du planétaire,
D_0 est le diamètre d'un satellite.

Si le planétaire est moteur et que la couronne est immobilisée il y a réduction, le mouvement de sortie étant recueilli sur le porte-satellites. La loi de Willys nous donne le rapport de réduction :

$$\frac{\omega_S}{\omega_P} = \frac{N + n}{n}$$

en appelant N le nombre de dents de la couronne et n le nombre de dents du planétaire.

Ce rapport est minimal et égal à 2 si n tend vers N, mais cette limite est théorique car elle supposerait un rayon nul des satellites. En pratique, il n'est pas possible de rendre ce rapport inférieur à 2,5.

Dans le cas où la grande couronne est motrice et où le planétaire est immobilisé, le porte-satellites est récepteur et nous avons de même :

$$\frac{\omega_C}{\omega_P} = \frac{N + n}{N}$$

Ce rapport ne peut évidemment varier qu'entre 1 et 2 et, là encore, il s'agit de limites théoriques puisqu'un rapport égal à 1 supposerait que le nombre de dents du porte-satellites soit nul (c'est-à-dire de rayon nul) et un rapport égal à 2 imposerait $N = n$, ce qui nous ramène au cas des satellites à rayon nul.

En pratique, il est impossible d'obtenir des rapports de réduction compris entre 1,66 et 2,5, tout au moins avec un train simple. Il faut recourir à des trains planétaires composés pour obtenir les valeurs comprises entre ces deux limites. Les satellites sont alors formés par un train double

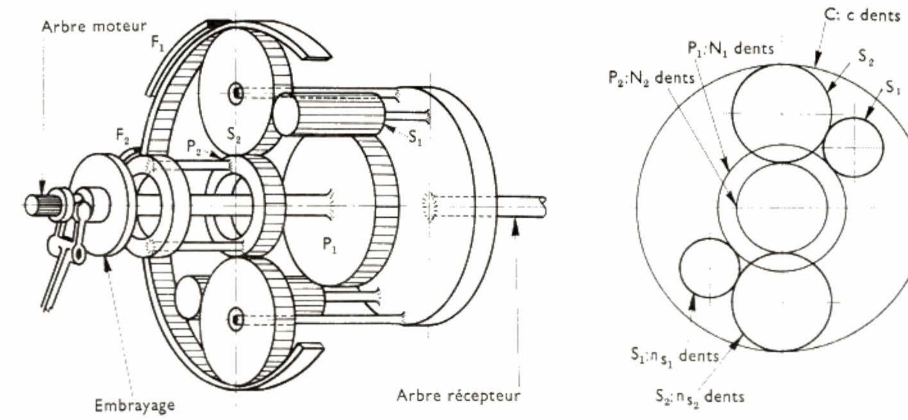


Fig. XVI-26

Trains épicycloïdaux à deux séries de satellites

dont une série (de nombre de dents n_{S_2}) engrène avec un planétaire et l'autre (de nombre de dents n_{S_1}) avec la couronne et l'autre planétaire (fig. XVI-26).

Appliquons la formule de Willys à ce train composé dans le cas où le planétaire est moteur et la couronne immobilisée. Nous avons :

$$\frac{\omega_S}{\omega_P} = \frac{N \cdot n_{S_1}}{n \cdot n_{S_2}} + 1$$

$n_{S_1} > n_{S_2}$: le rapport de réduction obtenu est plus grand qu'avec un train épicycloïdal simple ;

$n_{S_1} < n_{S_2}$ le rapport de réduction est plus petit qu'avec un train épicycloïdal simple ;

b) Conditions auxquelles doit satisfaire le nombre de dents. — Si un train simple comprend plus de deux satellites, l'assemblage n'est possible que si le nombre de dents des composants du train obéit à certaines lois. Or, pour des raisons de tenue mécanique, on emploie souvent trois ou quatre satellites. En pratique pour :

— deux satellites : le nombre de dents des composants n'obéit à aucune autre contrainte que celle liant le diamètre de la couronne, celui des satellites et celui des planétaires ;

— trois satellites :

si n est un multiple de 3, N est aussi un multiple de 3
si $n - 1$ est un multiple de 3, $N + 1$ est multiple de 3
si $n + 1$ est un multiple de 3, $N - 1$ est multiple de 3

— quatre satellites : n et N sont simultanément pairs ou impairs.

2.2.2. Boîte Ford T. — La première boîte de ce type montée en série équipait la célèbre Ford T. Fabriqué pendant la seconde moitié de la guerre 1914-1918, ce fut le premier modèle qui dépassa le million d'exemplaires. La boîte comprenait : une vitesse démultipliée, une prise directe et une marche arrière.

La figure XVI-27 et le tableau qui l'accompagne donnent une idée de la construction et du fonctionnement de cette boîte.

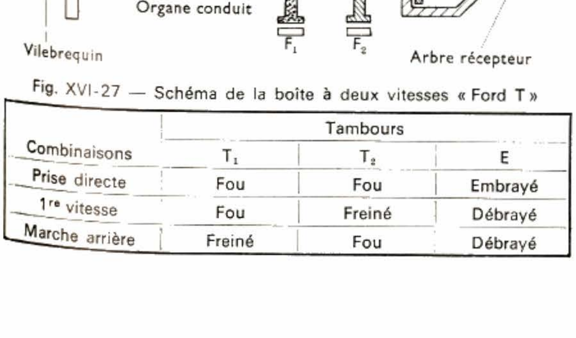


Fig. XVI-27 — Schéma de la boîte à deux vitesses « Ford T »

	Tambours		
Combinaisons	T_1	T_2	E
Prise directe	Fou	Fou	Embrayé
1re vitesse	Fou	Freiné	Débrayé
Marche arrière	Freiné	Fou	Débrayé

Le débrayage et le serrage du frein F_1 étaient obtenus par l'appui sur la pédale de marche arrière au premier cran, ce qui donnait la vitesse démultipliée ou 1re vitesse. À la position de repos de cette pédale on obtenait la prise directe, l'embrayage étant serré par son ressort. La pédale de marche arrière assurait le serrage de F_2 ; il était nécessaire alors d'utiliser le point mort obtenu par l'appui à fond au deuxième cran de la pédale de marche avant. Les deux pieds du conducteur pouvant ainsi être utilisés simultanément, l'accélérateur était commandé par une manette sous le volant et non par une pédale.

2.2.3. Boîtes électromagnétiques

1° *Généralités.* — Bien qu'elle ne soit plus utilisée actuellement, il a paru intéressant de décrire une boîte électromagnétique. Ces boîtes présentent, en effet, un ensemble de qualités fort intéressantes (simplicité, prix de revient relativement bas, facilité de commande automatique) et il n'est pas possible de faire un tour complet des différentes réalisations sans les décrire.

L'une des plus répandues a été la boîte Cotal, montée en particulier sur certains modèles Peugeot 402 et Salmson entre 1935 et 1950, et commercialisée sous les noms de Cotal-Salmson, Cotal-Maag, Cotal.

Une autre réalisation, connue sous le sigle Châtelet-Michelet et destinée à la traction avant Citroën est apparue vers 1950 ; elle était associée à un embrayage automatique Gravina. De plus, vers la même date, l'ingénieur français Pol Ravigneaux, en collaboration avec la firme Cotal, a réalisé l'électro-Fluid. Destinée aux voitures Ford pour la France, cette boîte était associée à un embrayage hydraulique type Weymann. Nous nous bornerons à une description succincte de la boîte Cotal Peugeot.

2° *Boîte Cotal*

a) *Description.* — Cette boîte comprend trois trains épicycloïdaux en série. Deux d'entre eux constituaient la boîte de vitesses électromagnétique proprement dite. Le troisième, appelé train auxiliaire, situé dans la chaîne cinématique tout aussitôt après l'embrayage et donc en avant de la boîte, avait un double rôle : réaliser un point mort et permettre la marche arrière en inversant le sens de rotation de la boîte électromagnétique. Celle-ci pouvait ainsi fournir quatre combinaisons de marche avant et quatre combinaisons de marche arrière affectées de la réduction du train d'inversion. Le troisième train était à commande mécanique.

La boîte électromagnétique proprement dite est constituée de deux trains épicycloïdaux en série, suivant le schéma de principe de la figure XVI-28 (page suivante). Ce schéma montre que le planétaire du train I reçoit son mouvement de la couronne du train auxiliaire.

L'originalité de la boîte Cotal réside dans le fait que les mouvements d'immobilisation ou de solidarisation des éléments des trains épicycloïdaux sont obtenus au moyen d'électroaimants alimentés en courant à partir de la batterie par l'intermédiaire d'un contacteur à commande manuelle ;

b) *Fonctionnement.* — Dans le train auxiliaire, le mouvement est communiqué par le planétaire. Le porte-satellites G peut occuper les positions suivantes :

- *en* ①, il est craboté sur la couronne et le train est en prise directe,

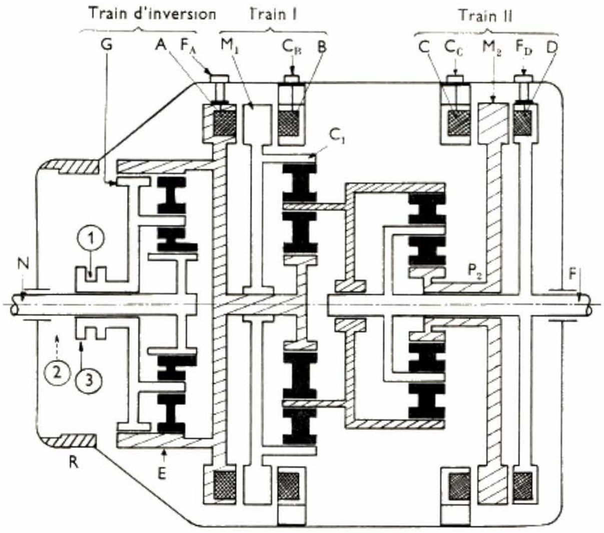


Fig. XVI-28 — Boite électromagnétique Cotal (*Peugeot*)

N : Arbre moteur ; F : Arbre récepteur ou de sortie ; A : Électroaimant solidaire de la couronne E ; B : Électroaimant fixe ; C : Électroaimant fixe ; D : Électroaimant solidaire de l'arbre F ; F_A : Frotteur alimentant A ; F_D : Frotteur alimentant D ; G : Porte-satellites du train d'inversion ; C_B : Contact alimentant l'électroaimant B ; C_C : Contact alimentant l'électroaimant C ; M_1 : Armature solidaire de la couronne C_1 ; M_2 : Armature solidaire du planétaire P_2 ; E : Couronne du train arrière ; R : Couronne de blocage du train arrière ; C : Couronne du train I ; P : Planétaire du train II

- *en* ②, il est craboté sur le carter de la boîte et réalise une inversion de raison : $\frac{n}{N}$, (*n* : nombre de dents du planétaire ; *N* : nombre de dents de la couronne) ;
- *en* ③, il y a point mort.

En première vitesse avant, le train auxiliaire ou d'inversion est en position 1 ; le train I est en réduction, c'est-à-dire que le mouvement est communiqué par le planétaire, la couronne C_1 étant immobilisée par rapport au carter de la boîte par l'électroaimant *B* qui bloque le plateau M_1.

Le train II est, lui aussi, en réduction ; le mouvement est transmis par la couronne C_2. Le plateau M_2 solidarisé sur *C* immobilise le planétaire et le mouvement est communiqué à l'arbre de transmission par le porte-satellites.

En deuxième vitesse rien n'est changé dans le train II, alors que le train I passe en prise directe, M_1 étant solidarisé sur *A*.

En troisième vitesse le train I repasse en position de réduction, c'est-à-dire en position de première vitesse, alors que le train II passe en prise, M_2 étant solidarisé sur *D*.

En quatrième vitesse, les deux trains sont en prise. Le tableau suivant donne la position des différents organes :

	Train I	M_1	Train II	M_2	Electro-aimant excité
1re vitesse	réduit	immobile	réduit	immobile	*B* et *C*
2e vitesse	prise	tourne avec *A*	réduit	immobile	*A* et *C*
3e vitesse	réduit	immobile	prise	tourne avec *D*	*B* et *D*
4e vitesse	prise	tourne avec *A*	prise	tourne avec *D*	*A* et *D*

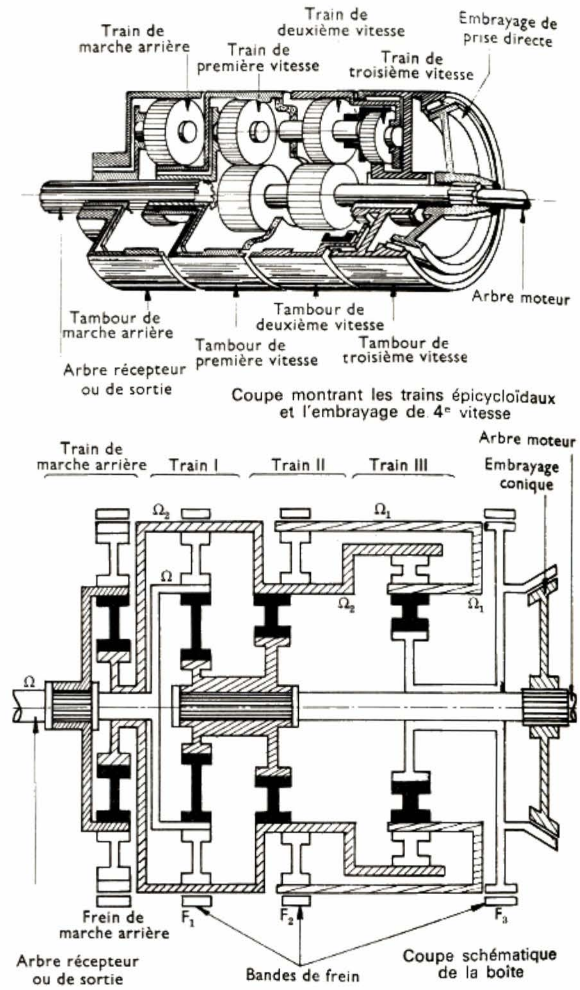
2.2.4. Boîtes à présélection

1° *Généralités.* — Ces boîtes peuvent être qualifiées de de semi-automatiques en ce sens que le choix de la combinaison de vitesses peut être retenu à l'avance, le passage effectif n'intervenant qu'au moment où l'on appuie sur la pédale de débrayage.

La plus répandue de ces boîtes a été la boîte Wilson du nom de son inventeur, major de l'armée anglaise, qui l'avait appliquée à des engins blindés britanniques en 1917-1918. Montée en série sur les véhicules Armstrong-Siddeley en 1928, elle fut introduite en France par Talbot vers 1930. Elle servit surtout à équiper des véhicules lourds et des autobus. Pendant la guerre de 1939-1945, elle fut fabriquée par la Daimler britannique, et montée sur des auto-mitrailleuses légères. Depuis, elle a retrouvé une certaine vogue sur des autobus. Nous décrirons ici la boîte à quatre vitesses qui est la plus couramment utilisée.

2° *Description mécanique de la boîte Wilson.* — La figure XVI-29 nous montre quatre trains épicycloïdaux simples à denture interne, à trois satellites et un embrayage.

Fig. XVI-29 — Boite de vitesses présélective Wilson



3° *Système de commande et de présélection.* — Nous avons vu que la commande de la boîte était obtenue par trois bandes de frein à collier et un embrayage. Ces quatre organes reçoivent leur énergie de serrage d'un ressort solidaire d'une pédale qui joue le rôle de la pédale d'embrayage, puisqu'il est possible d'annuler et de doser l'effort du ressort et de réaliser ainsi un certain patinage des bandes ou de l'embrayage (analogue à celui obtenu dans un embrayage ordinaire). La pédale et le ressort sont reliés par une timonerie à une barre parallèle à l'axe de la boîte, appelée « barre omnibus ».

La figure XVI-30 donne la disposition générale de la barre, des bandes de frein et de la commande de l'embrayage.

Les quatre schémas de la figure XVI-31 donnent les positions respectives de chacun des organes.

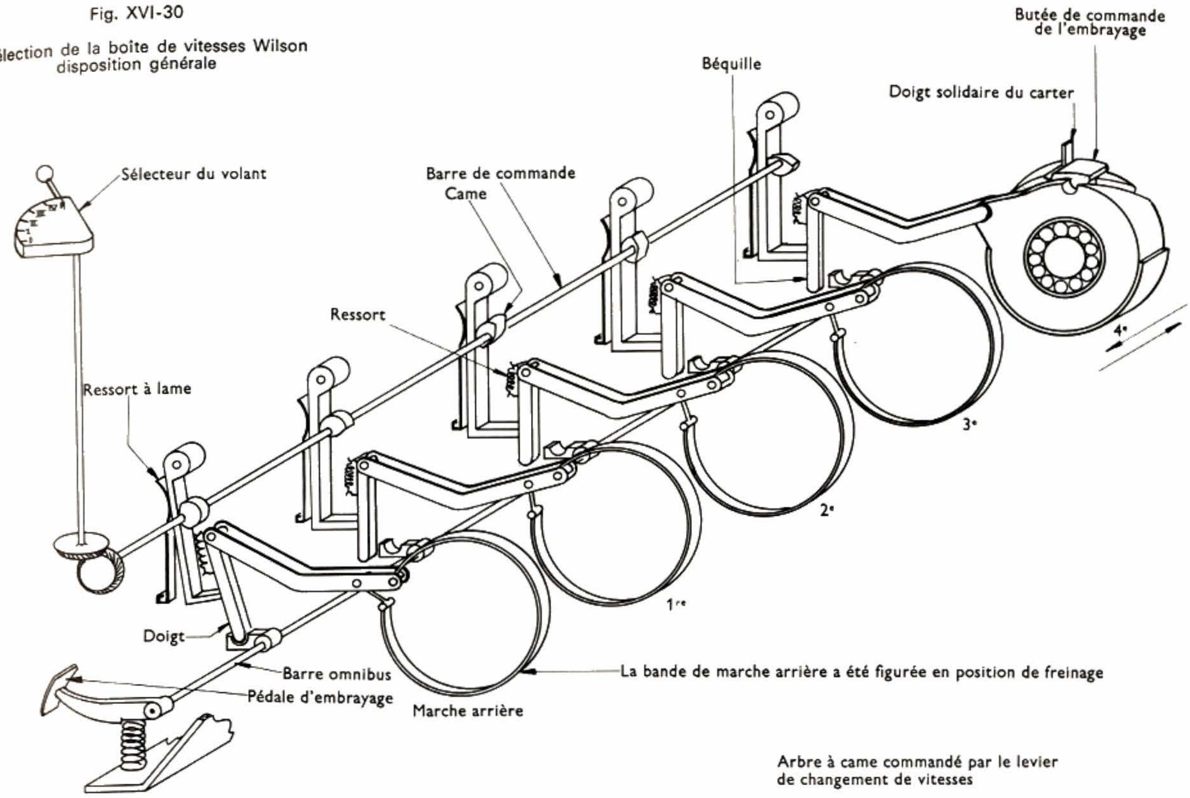
4° *Fonctionnement*

— Première vitesse. — La bande F_1 immobilise la couronne du train I. Les bandes F_2 ,F_3, la bande du train de marche arrière et l'embrayage sont libres. Le mouvement est communiqué par le planétaire du train I et est transmis vers l'arbre de sortie solidaire du porte-satellites de ce même train. La réduction est donc :

$$\frac{\omega_P}{\omega_S} = \frac{n}{N+n} = \frac{30}{102} = 0{,}294$$

Fig. XVI-30

Présélection de la boîte de vitesses Wilson disposition générale



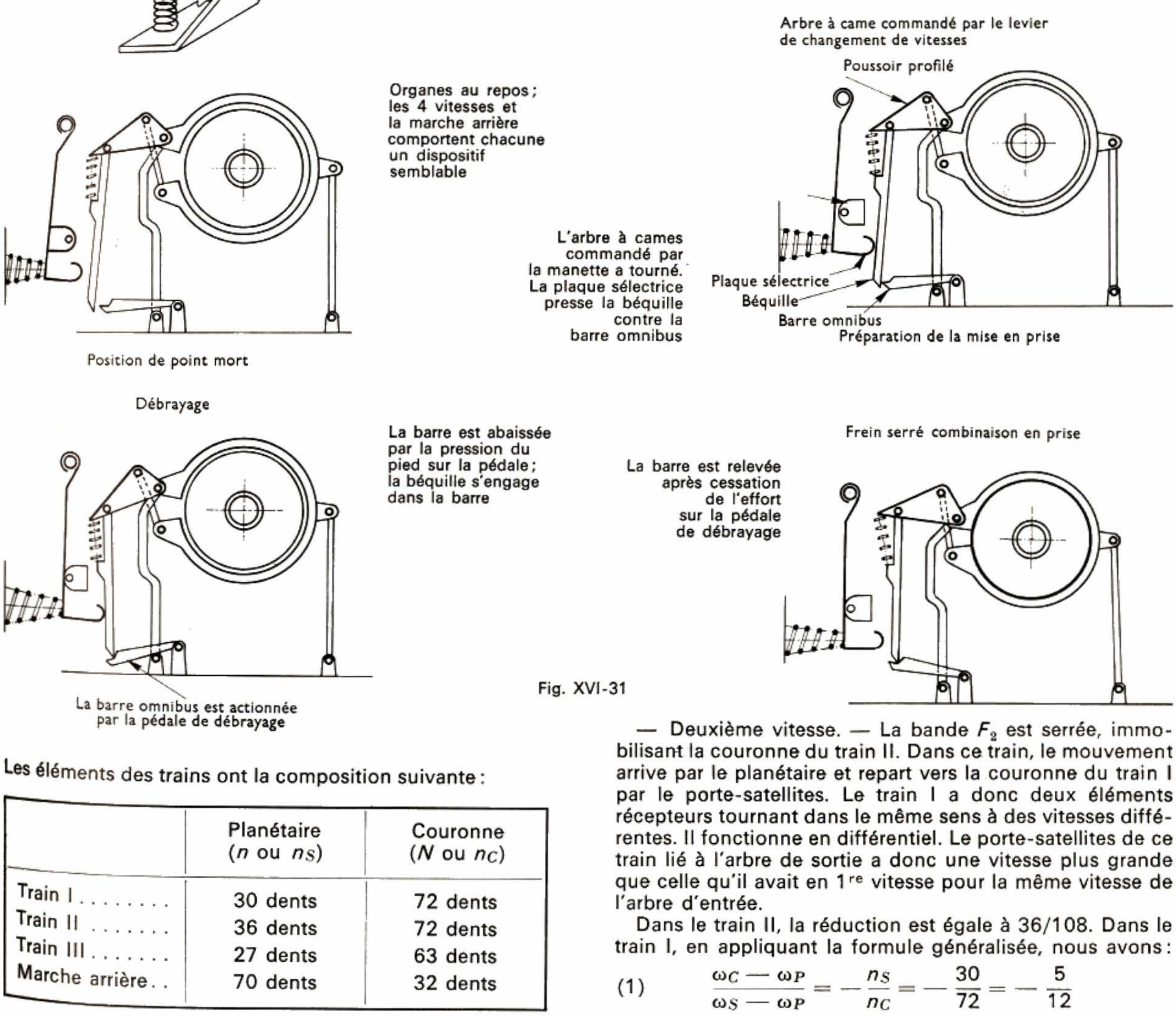


Fig. XVI-31

Les éléments des trains ont la composition suivante :

	Planétaire (n ou n_S)	Couronne (N ou n_C)
Train I	30 dents	72 dents
Train II	36 dents	72 dents
Train III	27 dents	63 dents
Marche arrière . .	70 dents	32 dents

— Deuxième vitesse. — La bande F_2 est serrée, immobilisant la couronne du train II. Dans ce train, le mouvement arrive par le planétaire et repart vers la couronne du train I par le porte-satellites. Le train I a donc deux éléments récepteurs tournant dans le même sens à des vitesses différentes. Il fonctionne en différentiel. Le porte-satellites de ce train lié à l'arbre de sortie a donc une vitesse plus grande que celle qu'il avait en 1re vitesse pour la même vitesse de l'arbre d'entrée.

Dans le train II, la réduction est égale à 36/108. Dans le train I, en appliquant la formule généralisée, nous avons :

$$(1) \qquad \frac{\omega_C - \omega_P}{\omega_S - \omega_P} = -\frac{n_S}{n_C} = -\frac{30}{72} = -\frac{5}{12}$$

Or : $\omega_C = \frac{\omega_S \times 36}{108} = \frac{1}{3}\omega_S$

puisque la couronne du train II est liée au porte-satellites du train I et que les deux planétaires sont communs. La formule (1) devient donc :

$$\frac{\frac{\omega_S}{3} - \omega_P}{\omega_S - \omega_P} = -\frac{5}{12} \quad (2)$$

Le rapport de réduction cherché étant $\frac{\omega_P}{\omega_S}$, divisons chaque terme de la première fraction par ω_S. L'équation (2) devient :

$$\frac{\frac{1}{3} - \frac{\omega_P}{\omega_S}}{1 - \frac{\omega_P}{\omega_S}} = -\frac{5}{12}$$

ou : $\frac{1}{3} - \frac{\omega_P}{\omega_S} = -\frac{5}{12}\left(1 - \frac{\omega_P}{\omega_S}\right)$

Nous en déduisons :

$$\frac{\omega_P}{\omega_S} = \frac{\frac{1}{3} + \frac{5}{12}}{1 + \frac{5}{12}} = \frac{9}{17} = 0{,}529$$

— Troisième vitesse. — La bande III est appliquée, immobilisant le planétaire du train III. Le mouvement est toujours communiqué par les deux planétaires des trains I et II mais par suite d'une interaction assez complexe dans les trois trains. Nous pouvons poser les équations suivantes :

(3) Dans le train I $\frac{\omega_{C_1} - \omega_{P_1}}{\omega_{S_1} - \omega_{P_1}} = -\frac{5}{12}$

(4) Dans le train II $\frac{\omega_{C_2} - \omega_{P_2}}{\omega_{S_2} - \omega_{P_2}} = -\frac{1}{2}$

(5) Dans le train III $\frac{\omega_{C_3} - \omega_{P_3}}{\omega_{S_3} - \omega_{P_3}} = -\frac{3}{7}$

Par construction : $\omega_{C_2} = \omega_{P_3}$
$\omega_{C_1} = \omega_{P_2} = \omega_{C_3}$
$\omega_{S_1} = \omega_{S_2}$

et en troisième vitesse $\omega_{S_3} = 0$

Donc l'équation (5) peut s'écrire : $\frac{\omega_{C_1} - \omega_{C_2}}{-\omega_{C_2}} = -\frac{3}{7}$

Nous pouvons exprimer ainsi ω_{C_2} en fonction de ω_{C_1} :

$$\omega_{C_1} = \frac{3}{7}\omega_{C_2} + \omega_{C_2} = \frac{10}{7}\omega_{C_2}$$

Donc : $\omega_{C_2} = \frac{7\,\omega_{C_1}}{10}$

Dans l'équation (4) reportons cette valeur de ω_{C_2} :

$$\frac{\frac{7}{10}\omega_{C_1} - \omega_{C_1}}{\omega_{S_1} - \omega_{C_1}} = -\frac{1}{2}$$

qui peut s'écrire :

$$\frac{7}{10}\omega_{C_1} - \omega_{C_1} = -\frac{1}{2}(\omega_{S_1} - \omega_{C_1})$$

ou encore : $3\,\omega_{C_1} = 5\,\omega_{S_1} - 5\,\omega_{C_1}$

donc : $\omega_{C_1} = \frac{5}{8}\omega_{S_1}$

Reportons ce résultat dans (3) :

$$\frac{\frac{5}{8}\omega_{S_1} - \omega_{P_1}}{\omega_{S_1} - \omega_{P_1}} = -\frac{5}{12}$$

$$\frac{5}{8}\omega_{S_1} - \omega_{P_1} = -\frac{5}{12}\omega_{S_1} + \frac{5}{12}\omega_{P_1}$$

$$\omega_{P_1}\left(1 + \frac{5}{12}\right) = \omega_{S_1}\left(\frac{5}{12} + \frac{5}{8}\right)$$

$$\frac{\omega_{P_1}}{\omega_{S_1}} = \frac{\frac{5}{12} + \frac{5}{8}}{1 + \frac{5}{12}} = \frac{25}{34} = 0{,}735$$

— *Prise directe.* — En prise directe, toutes les bandes sont desserrées ; l'embrayage est engagé. L'ensemble peut être considéré comme un volant ; les trois planétaires des trois trains sont solidarisés ; les raisons différentes des trois trains entraînent la solidarisation de tous les autres éléments.

— *Marche arrière.* — La bande de marche arrière immobilise la couronne du train d'inversion. Le mouvement est communiqué par le planétaire du train I.

Dans un premier temps, supposons que l'arbre de sortie de la boîte soit immobile. Par le jeu des satellites du porte-satellites du train I, la couronne de ce train tend à tourner en sens inverse des mouvements de l'arbre d'entrée et donc à entraîner dans le même sens le planétaire du train d'inversion auquel elle est liée.

Dans le train d'inversion, qui travaille en réducteur, la couronne étant immobilisée, le porte-satellites tend à tourner, lui aussi, dans le sens de marche arrière. Là encore il y a interaction entre les deux trains et c'est la différence de leurs raisons qui créé en fait l'inversion du mouvement.

Dispositifs annexes. — Nous pouvons maintenant mesurer la complexité et la perfection de cette boîte, réalisée, ne l'oublions pas, il y a plus de cinquante ans.

Le fait qu'elle soit encore employée avec une construction très proche de celle de la boîte originale prouve sa haute qualité. Plusieurs autres de ses caractéristiques méritent d'être soulignées, ce sont :

— Le réglage automatique des bandes. Celles-ci doivent fonctionner avec un jeu assez faible car elles travaillent dans l'huile, ce qui nécessite une grande pression de serrage. Le mode de commande à partir d'une pédale impose une démultiplication de commande importante et donc un dispositif de rattrapage d'usure. Chaque bande comporte son propre dispositif qui ne travaille qu'au moment de l'engagement de la bande, en utilisant le mouvement vertical de la béquille engagée dans la « cuiller » de la barre omnibus.

— Le centrage des bandes. La longueur de la boîte et l'impossibilité d'avoir un palier intermédiaire imposaient des systèmes de freins ne communiquant pas aux tambours des efforts susceptibles de créer des flexions des arbres. La figure XVI-32 donne une idée suffisante du frein qui utilise l'autoserrage d'une bande intérieure avec absorption de la réaction de freinage par un ancrage fixe.

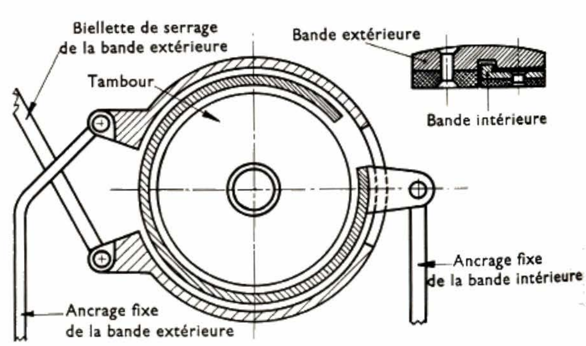


Fig. XVI-32 — Détails de fixation et de commande de la bande

— La possibilité de commande à distance. Pour la commande des doigts, l'arbre à cames que nous avons décrit peut très facilement être remplacé par un système d'électro-aimants ou par des servocommandes hydrauliques ou pneumatiques. Cette facilité trouve tout son intérêt dans les véhicules de transport en commun (autocars ou autobus) dont l'ensemble moteur-boîte est situé à l'arrière du véhicule.

3. TRANSMISSIONS CONTINUES

3.1. Généralités. — Ces systèmes méritent doublement le qualificatif de « continues ». En effet, d'une part, elles donnent un nombre infini de rapports de vitesses et, d'autre

part, elles ne nécessitent pas l'interruption du couple moteur pour passer d'une combinaison à une autre. On peut donc les qualifier de transmissions à variation continue du rapport de démultiplication et à accélération continue. Avant d'aborder l'étude de la première caractéristique, nous allons développer brièvement l'intérêt présenté par la seconde. La vitesse d'un véhicule et plus particulièrement ses possibilités d'accélération dépendent non seulement du rapport de la puissance du moteur à la masse du véhicule, mais aussi du coefficient d'utilisation du système propulseur, c'est-à-dire, en dernière analyse, de la puissance effectivement parvenue aux roues motrices dans un intervalle de temps donné rapporté à la puissance théoriquement disponible.

Toute manœuvre d'une boîte de vitesses à engrenages s'accompagne d'une manœuvre de l'accélérateur et de l'embrayage qui neutralisent la puissance du moteur pendant quelques secondes. En terrain difficile ou dans les encombrements, ce coefficient peut diminuer suffisamment pour faire perdre un pourcentage appréciable de la puissance. Au contraire, avec une transmission continue, les moteurs s'useront moins car ils sont soustraits aux reprises et décélérations qui accompagnent la manœuvre du changement de vitesses. La consommation sera, toutes choses égales par ailleurs, moins importante (car le régime d'accélération est loin d'être économique avec les carburateurs munis de pompes de reprise). De plus, les transmissions cessant d'être soumises à un régime assez sévère, pourront être plus légères et durer davantage.

3.2. Boîtes continues mécaniques

3.2.1. Système R.V.R. (fig. XVI-33). — L'une des réalisations les plus originales a été le système Robin van Rogen ; utilisé après la première guerre mondiale sur une voiture belge Minerva, le système faisait partie intégrante du moteur. Sur chaque maneton du vilebrequin, une seconde bielle était articulée ; elle reliait le vilebrequin à l'arbre de transmission par un système formé d'un triangle oscillant et d'une roue libre. L'axe d'articulation du triangle se trouvait dans un plan horizontal, perpendiculaire au plan vertical de symétrie du moteur ; il était mobile sous l'action d'un piston soumis à une pression d'huile variant avec la dépression prise en amont du papillon des gaz. Pour une position déterminée de l'accélérateur, la dépression variait comme le régime du moteur, c'est-à-dire en sens inverse du couple résistant. Pour un couple résistant donné, la dépression variait comme l'appui sur l'accélérateur.

3.2.2. Système Variomatic DAF (fig. XVI-34). — Chacune des roues motrices est entraînée par une courroie trapézoïdale. Cette courroie relie deux poulies à diamètre variable ; l'une augmente de diamètre utile, pendant que l'autre varie en sens inverse pour conserver la tension de la courroie. La vitesse de rotation du moteur agit sur la poulie menante au moyen d'un système centrifuge. Le diamètre effectif de cette poulie augmente avec la vitesse de rotation du moteur. Par ailleurs, la dépression prise dans la tubulure d'admission, en aval du papillon des gaz, fait

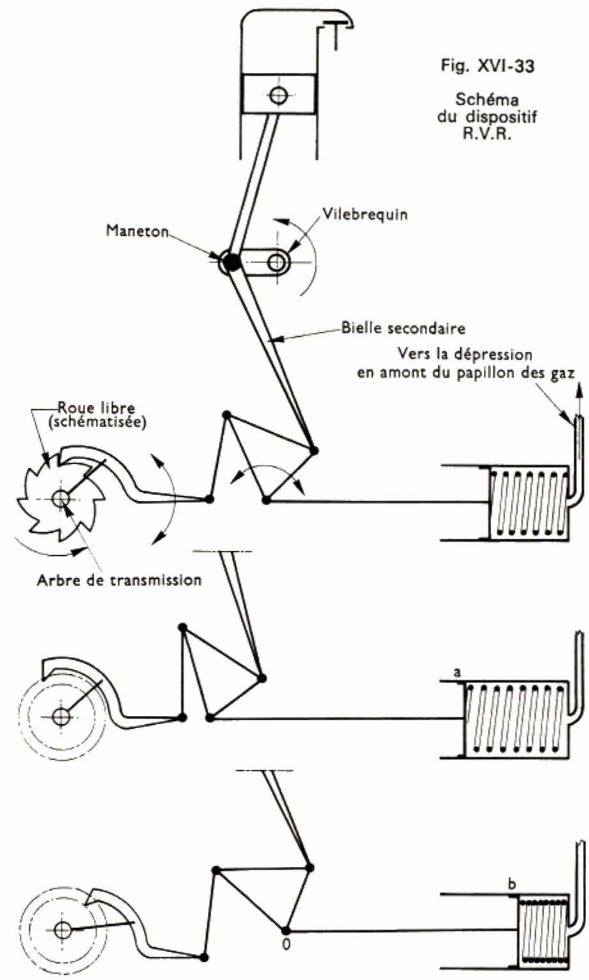


Fig. XVI-33

Schéma du dispositif R.V.R.

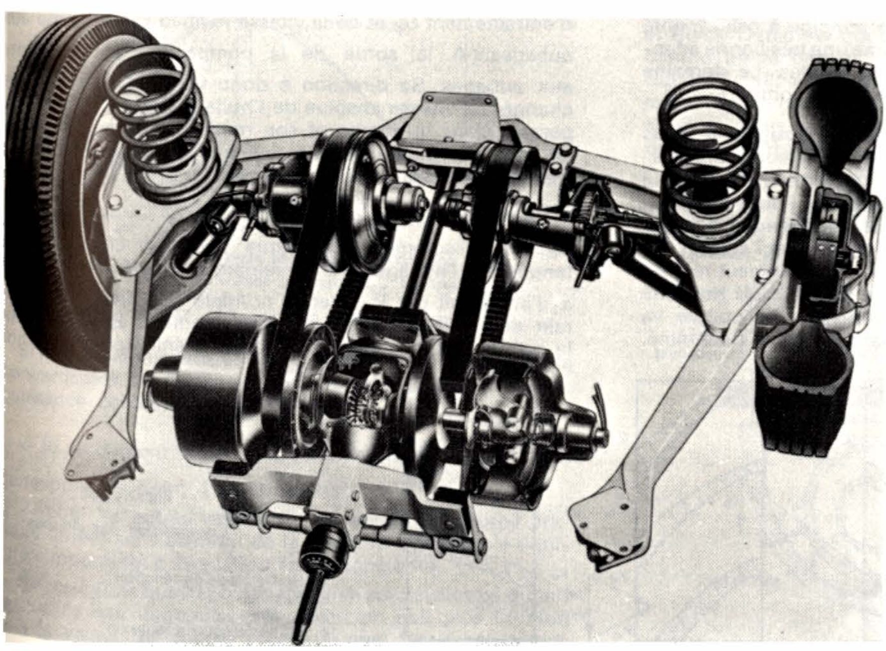


Fig. XVI-34

Transmission automatique « Variomatic » (*DAF*)

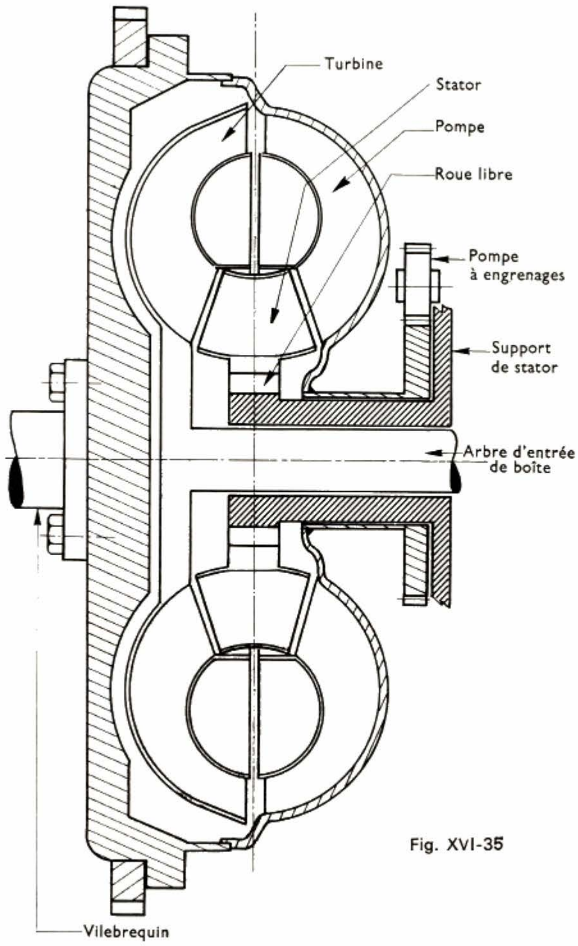


Fig. XVI-35

intervenir la charge du moteur et la position de l'accélérateur. À faible vitesse de rotation et avec l'accélérateur appuyé à fond, cette dépression est très faible ; elle est maximale à faible charge quand le papillon est peu ouvert et la vitesse du moteur assez grande.

Le diamètre de la poulie entraînée s'adapte automatiquement en sens inverse de celui de la poulie menante par actions de ressorts agissant sur une joue mobile. Ce système, d'ailleurs analogue dans son principe à celui monté sur les cyclomoteurs Mobylette, donne une très bonne adaptation du couple entre deux valeurs limites. Le domaine d'utilisation couvre tous les besoins de la voiture.

3.3. Variateurs hydrocinétiques de couple. — Nous avons à dessein employé le terme de variateur hydrocinétique au lieu de celui plus connu de convertisseur de couple pour bien marquer le mode d'action de l'huile ; celle-ci n'agit que par son énergie cinétique, indépendamment de toute idée de pression, exactement comme dans l'embrayage hydraulique. Mais à l'inverse de ce dernier qui peut réaliser un décalage des caractéristiques de couple mais non une multiplication de celui-ci, le convertisseur de couple va permettre de multiplier le couple par un rapport déterminé. Les possibilités sont moins étendues que dans les transmissions précédentes, il est vrai, mais elles n'en sont pas moins semblables à celles des boîtes mécaniques.

Dans son principe, le convertisseur de couple ne diffère de l'embrayage hydraulique que par la présence d'aubages de réaction destinés à modifier l'inclinaison des filets d'huile et dans lesquels prend naissance le couple de réaction.

Toutefois, les réalisations pratiques de l'embrayage hydraulique et celles des différents convertisseurs de couple présentent des différences assez grandes :

— les aubages de la pompe ne sont plus radiaux. Ils présentent la forme des profils de moindre résistance hydrodynamique avec portance, c'est-à-dire avec un profil très semblable à celui d'une aile d'avion,

— le flux de liquide est projeté par la pompe vers la périphérie et non plus parallèlement à l'axe de rotation,

— les aubages de la turbine ont un profil destiné à diminuer le plus possible la vitesse absolue de l'huile pour utiliser au mieux son énergie cinétique à l'entrée.

Le plus souvent, la turbine est à double ou triple étages avec des aubages de réaction fonctionnant, eux aussi, en plusieurs étages séparant les étages de la turbine.

La figure XVI-35 est la coupe d'un convertisseur de couple simple à un seul étage. Le dessin des aubages a été rabattu sur un plan ; il permet de suivre le trajet du filet d'huile et de remarquer les changements de direction importants qui sont imposés au fluide par les aubages. L'explication géométrique donnée à propos de l'embrayage hydraulique peut s'appliquer ici ; elle permet de mieux comprendre les différences fondamentales séparant cet ensemble et le convertisseur de couple.

Appelons : $\vec{V}$ la vitesse absolue de l'huile en un point, $\vec{U}$ sa vitesse d'entraînement, $\vec{v}$ sa vitesse relative ; la vitesse absolue est dans tous les cas la somme géométrique de la vitesse relative et de la vitesse d'entraînement. La vitesse relative est toujours tangente aux aubages. Nous pouvons admettre que la vitesse absolue à la sortie de l'un des éléments est égale à la vitesse absolue à l'entrée de l'élément immédiatement voisin. Il suffit pour cela (ce qui est pratiquement exact) que les pertes par tourbillonnement dans les entrefers soient négligeables. Affectons les symboles définis plus haut, des indices :

e pour l'entrée, *s* pour la sortie, *p* pour la pompe, *t* pour la turbine et *r* pour l'étage de réaction.

Pour la pompe nous pouvons écrire (fig. XVI-36) : $\vec{V_{ep}} = \vec{V_{sr}}$.

Par ailleurs, $\vec{V_{ep}}$ est la somme géométrique de la vitesse d'entraînement $\vec{U_p}$ et de la vitesse relative $\vec{v_{ep}}$ tangente aux aubages. À la sortie de la pompe $\vec{v_{sp}}$ est tangente aux aubages. Sa direction a donc varié, $\vec{U_p}$ n'ayant pas changé. La vitesse absolue de l'huile a changé de sens en passant dans la pompe et son module a augmenté. Cela ne demande aucune explication complémentaire puisque c'est le rôle essentiel de la pompe.

Dans la turbine : $\vec{V_{et}} = \vec{V_{sp}}$,

$\vec{V_{et}}$ est la somme géométrique de $\vec{U_t} < \vec{U_p}$ et de $\vec{v_{et}}$ tangente à l'aubage. Il est à remarquer que si l'on appelle α_1 l'angle fait par $\vec{V_{et}}$ avec la normale à la direction générale de l'aubage, la force d'entraînement appliquée sur la turbine est la somme des forces élémentaires agissant

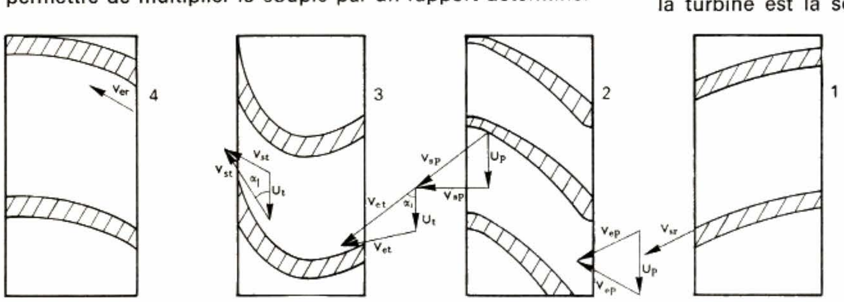


Fig. XVI-36

Composition des vitesses

1. Sortie étage de réaction
2. Turbine
3. Pompe
4. Entrée étage de réaction

sur les aubages. En tenant compte de la formule donnée dans l'étude de l'embrayage hydraulique :

$$F = m\ V_{et} \cos \alpha_1$$

le moment du couple élaboré sera :

$$T = R\ m\ V_{et} \cos \alpha_1$$

R étant le rayon moyen des aubages. Ce couple ne sera recueilli sur l'arbre de la turbine que si l'énergie cinétique du liquide a été complètement absorbée, ce qui n'est réalisé que pour un seul rapport de vitesses. À la sortie de la turbine, $\overrightarrow{V_{st}}$ est la somme géométrique de $\overrightarrow{U_t}$ et $\overrightarrow{v_{st}}$.

Soit α_2 l'angle fait par $\overrightarrow{V_{st}}$ avec la normale à la direction générale des aubages dans la turbine. La composition des vitesses montre que la valeur α_2 dépend de U_t. Si cette quantité est faible, c'est-à-dire encore si le glissement est important, U_t est petit et α_2 est supérieur à 90° ($\cos \alpha_2$ est négatif). Le couple appliqué sur la turbine par le liquide, à sa sortie de l'élément, est moteur par rapport à la turbine. Si, au contraire, U_t est grand (glissement faible), l'angle α_2 est inférieur à 90° ($\cos \alpha_2$ est positif). Le couple appliqué par le liquide à sa sortie de la turbine est résistant. Nous pouvons donc écrire que le moment du couple total appliqué sur l'arbre de la turbine est égal à :

$$T = R\ m\ (V_{et} \cos \alpha_1 - V_{st} \cos \alpha_2)$$

Cette relation représente d'ailleurs la formule générale des turbines hydrauliques. Par ailleurs, elle fait apparaître le mécanisme de la transformation automatique du couple qui dépend finalement du glissement. En effet, si U_t est petit, la quantité $V_{st} \cos \alpha_2$ est négative et les deux couples élémentaires s'ajoutent. Au contraire, si U_t croît, α_2 décroît, donc $\cos \alpha_2$ devient positif et les deux couples élémentaires se retranchent. Comme pour l'embrayage hydraulique, nous pouvons énoncer les lois suivantes :

— le moment du couple transmissible varie comme le carré de la vitesse de rotation, la puissance cinquième du diamètre et le glissement : $C = \frac{1}{k} \omega^2 . D^5 . g$,

— le moment du couple de démarrage varie comme le carré de la vitesse de rotation de la pompe,

— le rendement maximal de l'appareil ne dépasse guère 90 % par suite des tourbillons très importants qui prennent naissance dès que le glissement diminue. Il est obtenu pour un rapport de vitesses de la turbine à la pompe égal à environ 0,4 (fig. XVI-37).

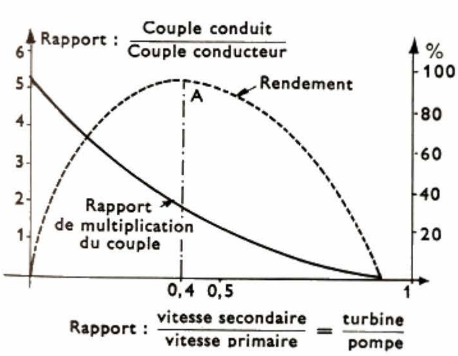


Fig. XVI-37 — Rendement du convertisseur

Si nous comparons la courbe couple-vitesse donnée par le convertisseur de couple à la courbe idéale tracée pour une puissance constante, nous constatons que :

— le rendement maximal, pour un rapport $\frac{\omega_t}{\omega_p}$ égal à 0,4, correspond au point A de la courbe ;

— pour les autres valeurs de ce rapport, la courbe pratique diffère sensiblement de la branche d'hyperbole équilatère répondant à l'équation $T\omega$ = constante.

Nous voyons que le couple maximal est développé quand la turbine est immobilisée. Il atteint un peu plus de cinq fois la valeur du couple sur la pompe. Nous constatons

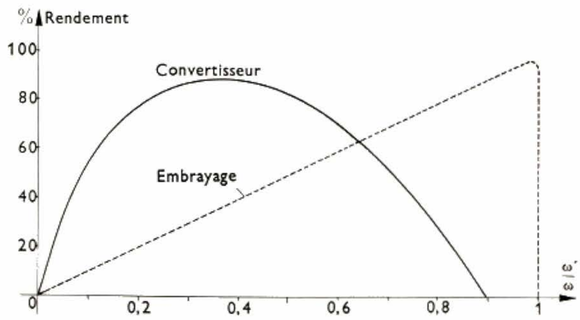


Fig. XVI-38 — Rendements comparés d'un convertisseur de couple et d'un embrayage hydraulique en fonction du rapport des vitesses de rotation de la pompe et de la turbine

aussi que le couple devient nul quand le glissement est inférieur à 10%. La faiblesse relative du rendement et aussi le fait que le point optimal de fonctionnement se trouve décalé vers un régime de rotation assez faible rendent peu intéressant l'emploi de cet appareil en dehors des périodes de démarrage ou de reprise. L'augmentation du nombre des étages de la turbine et du moteur a permis une légère augmentation du rendement.

Toutefois, il est apparu très vite que le convertisseur de couple et l'embrayage hydraulique pouvaient se compléter très heureusement. En effet, la figure XVI-38, qui représente les courbes de rendement établies en fonction des rapports de vitesses, montre que le rendement de l'embrayage hydraulique devient très intéressant à partir du moment où celui du convertisseur de couple s'avère trop faible. On a donc cherché à transformer le convertisseur de couple en volant fluide. La différence fondamentale entre les deux appareils résidant dans la présence des aubages de réaction, il suffisait, sinon de les supprimer, du moins d'annuler leur action à partir du moment où ils n'intervenaient plus comme éléments de réaction et se transformaient en frein hydraulique (variation de l'angle α_2). Les convertisseurs Brockouse et Buick ont tous deux utilisé cette possibilité en montant les aubages de réaction sur roue libre.

Tant que les filets d'huile s'appuient sur les aubages de réaction pour provoquer une multiplication du couple, les roues libres restent bloquées. Au contraire, dès que les filets d'huile tendent à entraîner le réacteur, les roues libres autorisent sa rotation et le convertisseur se transforme en embrayage hydraulique. L'amélioration du rendement obtenue tient à la suppression des tourbillons entre organes fixes et organes mobiles. Les figures XVI-39 et XVI-40 représentent respectivement les convertisseurs Brockouse et Buick-Dynaflow qui utilisent un artifice de ce genre. La courbe de rendement (V. fig. XVI-41) du convertisseur Buick-Dynaflow met en évidence l'amélioration du rendement. Cette courbe de rendement présente notamment deux crochets qui correspondent à la mise en action des deux étages du stator.

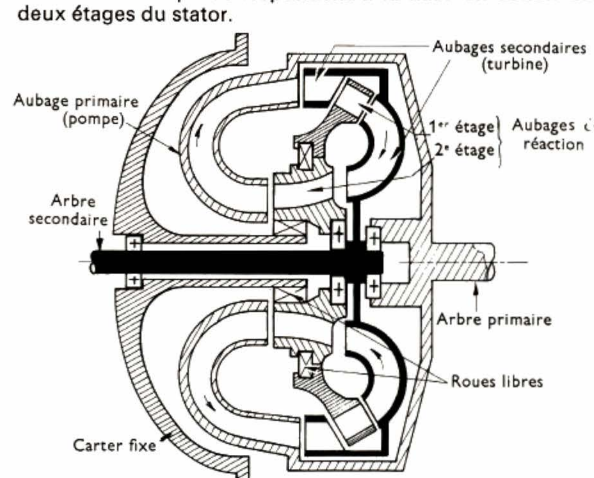


Fig. XVI-39 — Convertisseur Brockouse

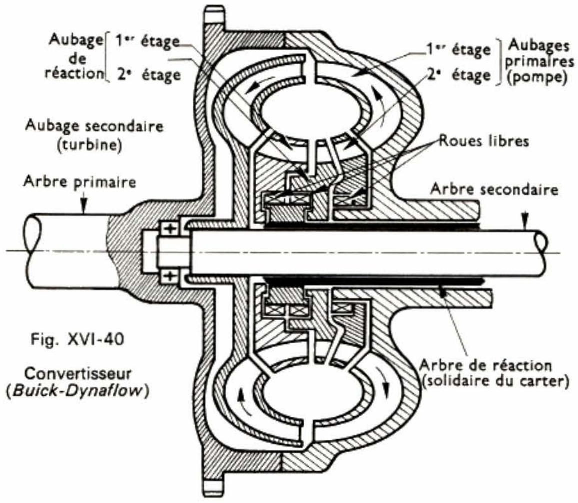
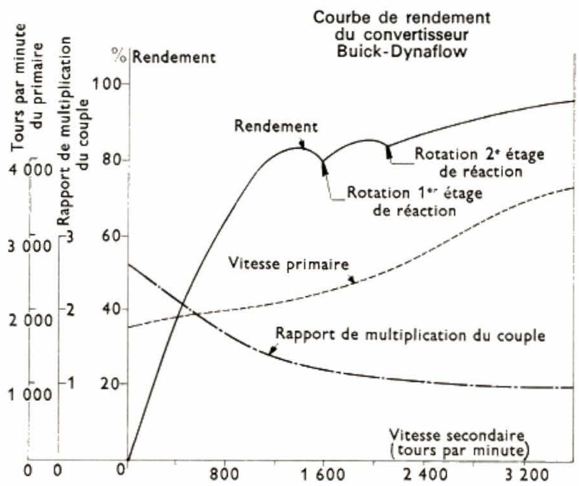


Fig. XVI-40

Convertisseur (*Buick-Dynaflow*)



3.4. Transmissions volumétriques

3.4.1. Généralités. — Ces transmissions, encore appelées hydrostatiques, qui n'avaient été employées jusqu'à ces dernières années que pour des emplois discontinus (commande de tourelles d'artillerie ou de chars, système de commande de direction d'engins chenillés) commencent à faire leur apparition dans des applications qui requièrent un usage continu. C'est ainsi qu'elles sont employées comme système de transmission sur des engins automoteurs pour les travaux publics ou pour l'agriculture (moissonneuses-batteuses, par exemple). Un prototype d'engin à deux roues a même été doté de ce type de transmission. Ces systèmes ont été qualifiés de « volumétriques » car, théoriquement, les volumes engendrés dans la partie génératrice et la partie réceptrice sont les mêmes. Dans la suite nous utiliserons les symboles suivants :

Grandeur	Partie génératrice	Partie réceptrice
Fréquence de rotation des arbres (en tours par minute)	n_g	n_r
Course des pistons	c_g	c_r
Surface des pistons	s_g	s_r

Le rapport des vitesses des arbres doit répondre à l'égalité :

$$\frac{n_r}{n_g} = \frac{c_g}{c_r} \cdot \frac{s_g}{s_r}$$

Nous voyons qu'en plus de la démultiplication variable nous pouvons obtenir une démultiplication permanente en différenciant par construction soit la course, soit l'alésage, soit leur produit qui est la cylindrée.

3.4.2. Principe. — Dans leur principe, ces transmissions offrent trois parties principales :

— Le générateur, constitué par une pompe à pistons radiaux ou parallèles, à course variable, et entraînée à vitesse et à sens constants par un moteur thermique par exemple. Le débit de la pompe varie comme la course utile des pistons. Le sens et la valeur du débit obtenu varient avec l'excentration de l'axe de l'organe de commande des pistons par rapport à l'axe de l'appareil ou avec l'inclinaison du plateau de commande des pistons.

— Le récepteur, qui offre en général une disposition similaire à celle du générateur, mais qui peut aussi se présenter sous la forme d'un moteur à engrenages.

— Le système de distribution.

L'ensemble est alimenté en huile légère à partir d'un réservoir ; une pompe d'alimentation primaire assure le remplissage et la purge du système.

3.4.3. Caractéristiques principales

1° *Souplesse d'emploi.* — Ces systèmes assurent une variation continue du couple et donnent une réversibilité totale, c'est-à-dire qu'elles donnent une plage aussi étendue en marche arrière qu'en marche avant.

2° *Facilité de commande.* — La variation de la course des pistons s'obtient d'une façon extrêmement simple par le déplacement d'une tige ou d'un manchon ; la commande automatique ou la servocommande peuvent se réaliser facilement.

3° *Rendement.* — Les progrès réalisés, en particulier sur la précision d'usinage des pièces et aussi sur les liquides employés, ont permis de remédier, dans une certaine mesure, aux défauts inhérents à ces systèmes. Le rendement total est le produit du rendement cinématique et du rendement statique.

Le rendement cinématique dépend surtout des fuites intérieures entre circuit haute pression et circuit basse pression ; elles sont liées :

— à la précision de l'usinage,
— à la température du liquide,
— à la pression développée,
— à la vitesse de rotation des organes.

Le rendement en couple est obéré par :

— les pertes mécaniques : frottements divers,
— les pertes hydrauliques (pertes de charge et laminage du liquide).

En pratique, on obtient actuellement un rendement compris entre 0,80 et 0,85.

4° *Température du liquide.* — La viscosité du liquide a une très grande influence sur le rendement et les possibilités de ces transmissions. Trop importante, elle crée des pertes de charge surtout sensibles dans le cycle d'aspiration du générateur. Trop faible, elle occasionne des fuites qui diminuent le rendement. Les huiles actuelles présentent des courbes de viscosité très améliorées par rapport à celles des huiles fabriquées il y a quelques dizaines d'années. Elles ont bénéficié des travaux faits dans le domaine des huiles de graissage dites multigrades des moteurs d'automobiles. Malgré tout, ces transmissions doivent fonctionner très près d'une température optimale comprise entre 45 et 50 °C. L'échauffement relativement important résultant du brassage et du laminage du liquide est combattu par des radiateurs appropriés. Par temps très froid, une période de restriction ou de limitation d'emploi doit intervenir jusqu'à ce que la mise en température soit réalisée.

5° *Étanchéité du système.* — Les hautes pressions employées (jusqu'à 300 bars) provoquent des fuites :

— soit intérieures entre circuits haute et basse pression, comme indiqué plus haut ; elles n'offrent pas d'autre inconvénient qu'une diminution de rendement ;

— soit extérieures, en particulier au niveau des arbres d'entrée et de sortie de mouvements : ces dernières doivent être recueillies par des aménagements appropriés qui peuvent être des chambres de récupération ménagées entre joints spéciaux à lèvres ou toriques.

Il est indispensable que cette étanchéité soit aussi effective de l'extérieur vers l'intérieur car toute particule abrasive introduite dans un système usiné avec des tolérances très faibles (voisines de 3 à 5 µm) provoquerait une

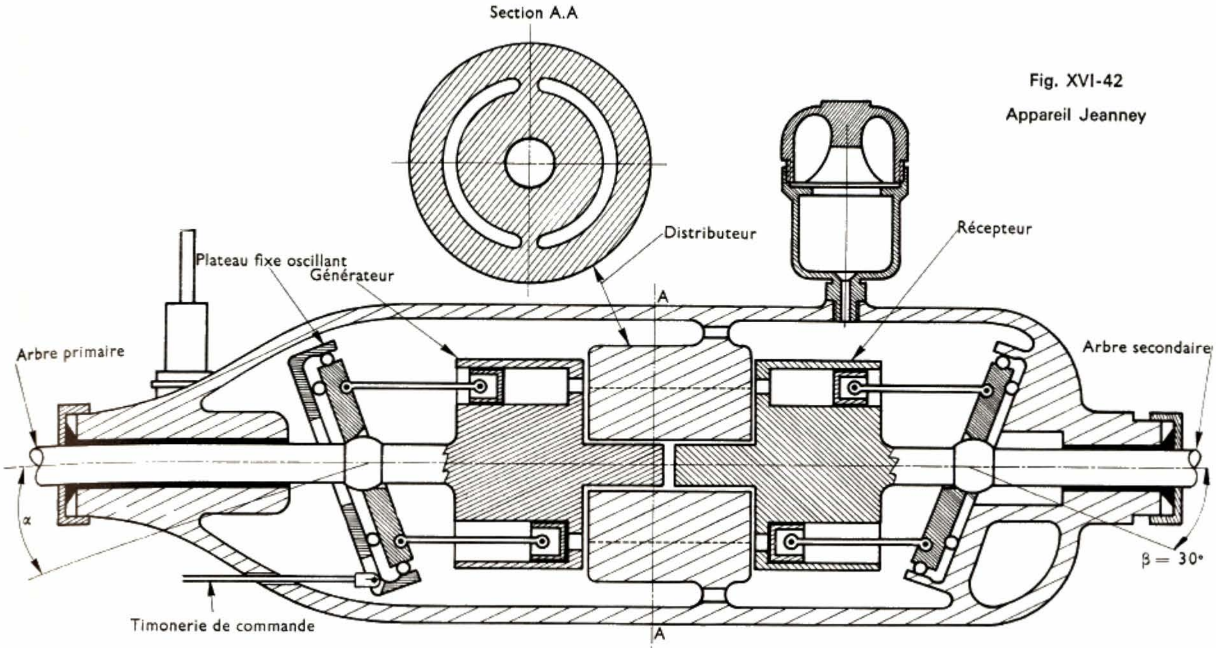


Fig. XVI-42

Appareil Jeanney

détérioration rapide de l'ensemble. Les risques de pollution du liquide sont particulièrement importants au niveau des joints des chambres de récupération, et l'huile recueillie doit être soigneusement filtrée à son retour au réservoir principal.

6° *Vitesse de rotation.* — Nous avons souligné ci-dessus l'influence néfaste de l'échauffement dû aux mouvements du liquide. Cela s'oppose à une vitesse de circulation trop importante et limite donc les vitesses de rotation du générateur et de la pompe.

3.4.4. Appareil Jeanney. — Cet appareil, déjà ancien, permet de bien comprendre le fonctionnement de ce genre de transmission. Les réalisations récentes obéissent aux mêmes principes. Par ailleurs, signalons que de nombreux systèmes hydrauliques utilisent la partie génératrice comme pompe d'alimentation.

La régulation de pression de celle-ci peut être réalisée très facilement en commandant l'inclinaison du plateau par un ressort taré (pompe d'alimentation haute pression de la DS Citroën).

1° *Partie génératrice.* — On y trouve un corps de pompe ou barillet percé de neuf cylindres semblables dont les axes sont symétriquement répartis sur un cylindre ayant pour axe celui du barillet. Dans chacun de ces cylindres se déplace un piston ; le mouvement de celui-ci est réglé par un plateau dont l'axe de rotation fait avec celui du barillet un angle pouvant varier de — 45° à + 45° environ. Le débit de la pompe varie comme cet angle.

2° *Système de distribution.* — Il ne comporte aucune pièce mobile. Il est formé de deux rainures circulaires centrées sur l'axe du barillet, ayant pour rayon moyen celui du cylindre, et lieu des axes des cylindres du barillet. Ces deux rainures, situées symétriquement de part et d'autre du plan de la figure XVI-42, sont séparées par un intervalle supérieur à l'alésage des cylindres de façon à ce qu'il n'y ait pas de possibilité de communication entre elles. Comme son nom l'indique, le distributeur assure la communication et la répartition du liquide entre la partie génératrice et la partie réceptrice.

3° *Partie réceptrice.* — Elle est très semblable à la partie génératrice, avec toutefois cette différence que l'angle β des axes est constant et égal à 30°.

4° *Fonctionnement.* — Si $\alpha = 0$, les pistons ne se déplacent pas dans les cylindres, aucun liquide n'est aspiré ni refoulé.

Si α est différent de 0, les pistons se déplacent entre deux positions extrêmes obtenues dans le plan de la figure XVI-42. Il y a, par exemple, refoulement en avant de ce plan, aspiration en arrière.

Dans la partie réceptrice, le sens de rotation sera, pour le cas de la figure, le même que celui de la partie génératrice. Désignons par α l'angle variable dans la partie génératrice, par β l'angle constant et égal à 30° dans la partie réceptrice, par ω_g et ω_r les vitesses de rotation respectives du générateur et du récepteur ; nous pouvons écrire :

$\alpha > 30°$ (cas théorique) $\Rightarrow \omega_r > \omega_g$
$\alpha = 30° \Rightarrow \omega_r = \omega_g$
$\alpha < 30° \Rightarrow \omega_r < \omega_g$
$\alpha = 0° \Rightarrow \omega_r = 0$
$0 < \alpha < -30°$ (ω_r négatif) $\Rightarrow -\omega_g < \omega_r < 0$
$\alpha = -30° \Rightarrow \omega_r = -\omega_g$
$\alpha < -30° \Rightarrow \omega_r < -\omega_g$

Dans la partie réceptrice, chacun des pistons reçoit une poussée égale à :

$$S.p = F = \frac{\pi\, d^2}{4}.p$$

S, étant la section d'un piston, *d* son diamètre et *p* la pression de fonctionnement.

Cette force *F* (fig. XVI-43) peut se décomposer en :

— une force F_1 perpendiculaire au plateau et absorbée par la réaction des supports,

— une force F_2 dans le plan du plateau et créant un couple de rotation de valeur $T = F_2 . r$, *r* étant le rayon moyen du cylindre sur lequel se trouvent les axes des cylindres élémentaires.

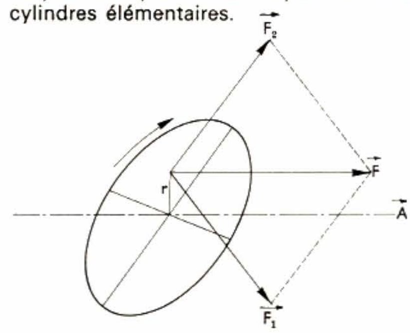


Fig. XVI-43

Décomposition des forces

4. BOÎTES DE VITESSES AUTOMATIQUES

4.1. Historique. — Apparue vers 1910 pour des diesels marins de grandes puissances, la transmission automatique a été étudiée pour l'automobile, en Allemagne, vers la fin de la première guerre mondiale. En 1925, Reiseler étudie une boîte constituée d'un train épicycloïdal à deux rapports conjuguée avec un convertisseur de couple. En France, on peut citer :

— la réalisation d'une balance de couple inventée par l'ingénieur Fleischel, qui constituait le principe de la servocommande ;

— la boîte Auto-serve Kegresse, qui était destinée à la traction avant Citroën et utilisait déjà une commande hydraulique ;

— l'Électro Fluid Cotal, constituée d'une boîte électromagnétique par ailleurs semblable à celle décrite (V. § 2.2 3) liée à un coupleur hydrocinétique. Elle était due à l'ingénieur Pol Ravigneaux ;

— la boîte Châtelet-Michelet, qui comportait aussi des trains épicycloïdaux à commande électromagnétique, associée à un embrayage Gravina (seul l'embrayage était automatique).

Plus près de nous, la Régie nationale des usines Renault s'est engagée sur la voie de la commande automatique avec la Transfluide de la Frégate et les boîtes de la Dauphine, puis de la R8.

Aux États-Unis d'Amérique, la célèbre boîte Hydramatic équipant les modèles General Motors (en particulier Oldsmobile et Cadillac), a connu une très grande diffusion vers 1940 ; presque simultanément, Chrysler sortait la Fluid drive. Peu après 1945, nous voyons la réapparition du convertisseur de couple associé à des boîtes à un ou trois rapports avec l'Ultramatic de Packard, Dynaflow de Buick, Automatic Drive de Studebaker ; aujourd'hui ces transmissions automatiques sont très répandues aux États-Unis d'Amérique (plus de 90% des voitures particulières en sont munies).

En Europe, la boîte automatique a pris un bon départ après une période de désaffection qui semble s'estomper. On estime qu'un véhicule sur quatre est muni d'une telle transmission.

En France, les quatre grands constructeurs présentent au moins un modèle, le dernier en date ayant été Citroën avec une boîte à convertisseur de couple sur la GS. La construction de boîtes automatiques relève maintenant de la production en grande série, ce qui permet d'en augmenter la diffusion.

4.2. Principe. — Les systèmes étudiés jusqu'ici apportaient au conducteur des facilités plus ou moins grandes pour le passage des combinaisons de la boîte de vitesses, mais lui laissaient l'intégralité de la décision en ce qui concernait le moment du passage d'une combinaison à la combinaison inférieure ou supérieure. Or, il faut être un conducteur expérimenté et attentif, connaissant bien la voiture pilotée et l'itinéraire parcouru, pour effectuer toujours le choix le plus judicieux.

Nous avons souligné au début de ce chapitre que l'un des rôles principaux de la boîte de vitesses était d'adapter le couple résistant au couple moteur. Nous avons vu également que la courbe de couple d'un moteur déterminé présentait un maximum situé à une vitesse de rotation plus ou moins éloignée du régime maximal et qu'il était souhaitable d'utiliser le moteur au voisinage de son maximum de couple pour une marche économique. Au contraire, si le choix se porte sur la nervosité, et les performances, il faut alors « monter les intermédiaires », c'est-à-dire utiliser le moteur dans chacune des combinaisons jusqu'à un régime plus voisin de sa vitesse de rotation maximale. Dans la servocommande de toute boîte automatique ces différents paramètres sont utilisés pour commander le passage des vitesses.

— *Le couple moteur* est « introduit » soit sous la forme de la vitesse du moteur ou de l'arbre d'entrée de la boîte, soit, et c'est là le cas le plus fréquent, en enregistrant la position de l'ouverture du papillon des gaz du carburateur par une commande reliée à la pédale d'accélérateur, soit encore en utilisant la dépression d'admission du moteur.

— *Le couple résistant* est pris en compte à partir de la vitesse de l'arbre de sortie de la boîte ; toute accélération de cet arbre suppose, en effet, que le moment du couple moteur est supérieur au moment du couple résistant.

De plus, certains dispositifs annexes permettent soit d'utiliser le frein-moteur en descente, en réalisant un asservissement temporaire, soit encore de décaler le passage des vitesses ou d'interdire la combinaison supérieure pour permettre de disposer de meilleures reprises, par exemple, pour doubler rapidement.

4.3. Boîte automatique Z.F. — Cette transmission, fabriquée par la firme allemande de Friedrichshafen, *Zahnrad Fabrik*, comporte un seul train épicycloïdal complexe associé à un convertisseur de couple.

4.3.1. Étude mécanique

1° *Convertisseur de couple.* — Il s'agit d'un convertisseur Fichtel Sachs dérivé du système Föttinger. Il comprend trois éléments avec un stator monté sur roue libre analogue dans son principe au système décrit au paragraphe 3.3. Il fournit une plage de multiplication de couple de 2,29/1 à 1/1 pour un rapport de la vitesse de sortie à la vitesse d'entrée de 0,9. Dès que l'élément récepteur dépasse 90 % de la vitesse de l'élément d'entrée, le stator entre en rotation et l'ensemble se transforme en embrayage hydraulique. Au ralenti du moteur, le convertisseur permet un débrayage plus ou moins franc en fonction de la température de l'huile avec un léger entraînement résiduel qui facilite les opérations de stationnement.

2° *Train épicycloïdal.* — Le train épicycloïdal complexe utilisé dans la boîte Z.F. est transposé du train qui équipait la boîte Électro Fluid. Ce train, qui peut donner trois vitesses de marche avant et une de marche arrière, est dû à l'ingénieur Pol Ravigneaux. Il comprend (fig. XVI-44) :

— deux planétaires d'entrée de mouvement ayant respectivement 32 et 25 dents ;

— une couronne unique de 64 dents solidaire de l'arbre de sortie de la boîte ;

— un porte-satellites comportant un double train de trois satellites de 15 dents.

Les satellites de la première série engrènent, d'une part, avec le planétaire de 32 dents et, d'autre part, avec la couronne de l'arbre de sortie. Ceux de la deuxième série engrènent avec le planétaire de 25 dents, d'une part, et avec leurs homologues de l'autre série de satellites, d'autre part. Leurs axes se trouvent donc sur un cercle de diamètre inférieur à celui du cercle sur lequel se trouvent les axes des satellites de l'autre série.

3° *Système de commande du train* (fig. XVI-45 et XVI-46). — Il est équipé de cinq enbrayages à disques

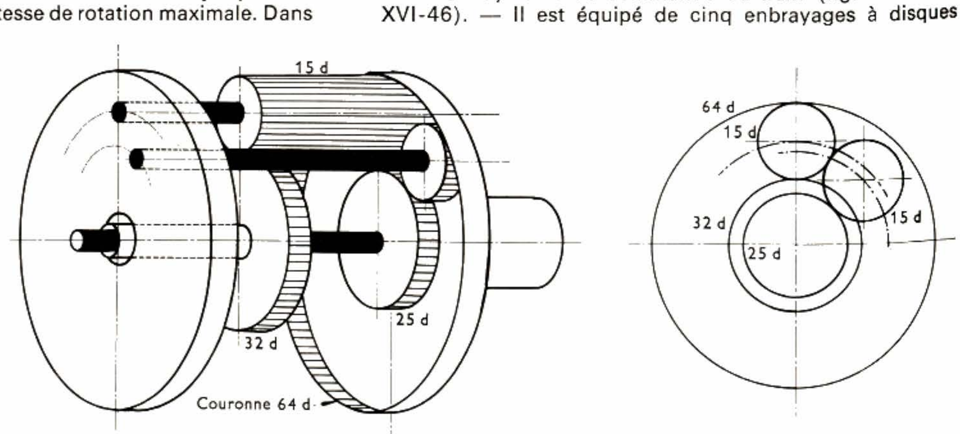


Fig. XVI-44

Train épicycloïdal (*Ravigneaux*)

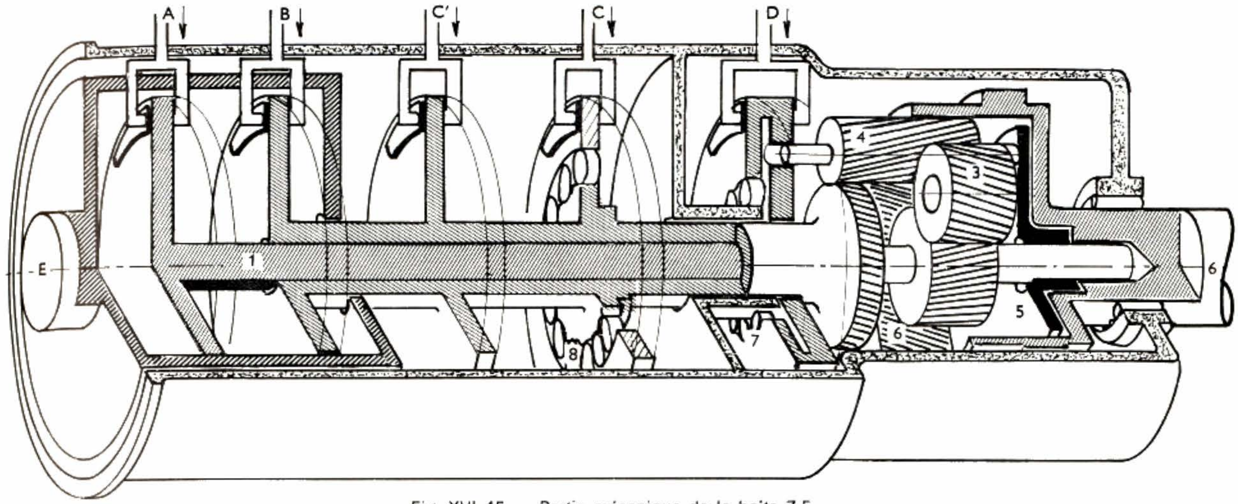


Fig. XVI-45 — Partie mécanique de la boite Z.F.

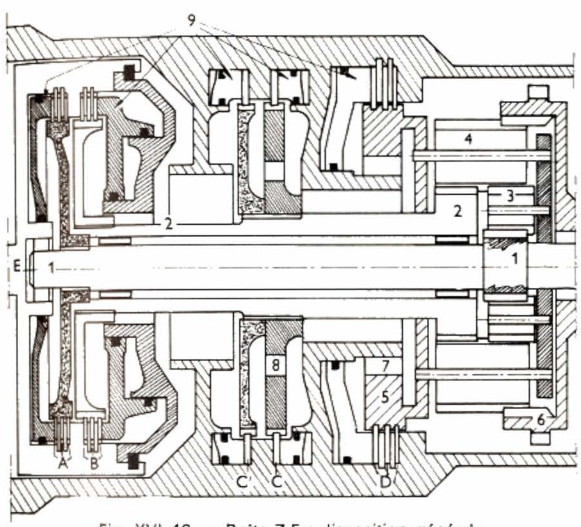


Fig. XVI-46 — Boite Z.F.; disposition générale

multiples commandés par des pressions d'huile. Deux de ces embrayages *A* et *B* sont situés dans un tambour tournant, faisant partie de l'arbre d'entrée de la boite. *A* peut solidariser l'arbre primaire intérieur 1 relié au planétaire de 25 dents avec le tambour. L'arbre secondaire 2 relié au planétaire de 32 dents peut, de la même façon, être solidarisé au tambour par l'embrayage *B*. Les trois autres embrayages *C'*, *C* et *D* peuvent également, sous l'action de la pression d'huile, immobiliser l'arbre 2 ou le porte-satellites par rapport au carter :

— *C* et *C'* immobilisent alternativement ou simultanément l'arbre 2, soit directement par un plateau pour *C'*, soit avec interposition d'une roue libre pour *C* ;

— le porte-satellites du train peut, soit être immobilisé par rapport au carter par l'embrayage *D*, soit pouvoir entrer en rotation dans un sens déterminé grâce à une roue libre dont la partie centrale est fixée au carter de la boite.

4.3.2. Fonctionnement mécanique. — En marche avant, le levier de commande peut occuper deux positions :

— l'une normale, appelée ville-route : *V-R.* ;

— l'autre dite exceptionnelle, qui peut être employée dans les parcours difficiles de montagne ou pour la conduite dite sportive.

1° *Première vitesse.* — Elle n'est utilisée qu'en position exceptionnelle pour le démarrage ; en position ville-route, elle n'intervient qu'occasionnellement pour une reprise énergique quand l'accélérateur est appuyé complètement à fond (post-accélération).

La première vitesse est obtenue par action des embrayages *A* et *D* (démultiplication obtenue : 0,391).

2° *Deuxième vitesse.* — C'est la combinaison normale sur laquelle s'opère le démarrage du véhicule en position *V-R*. Les embrayages commandés sont :

— l'embrayage *A* comme en première, qui solidarise l'arbre 1 par rapport au tambour ;

— l'embrayage *C* qui bloque l'arbre 2 par rapport au carter.

Le mouvement est communiqué au train par le planétaire 1. La série de satellites 4 entraînée par la série de satellites 3 se déroule sur le planétaire 2 immobile en même temps qu'ils entraînent la couronne 6. La roue libre portant le porte-satellites 5 autorise la rotation de ce dernier dans le sens de la marche avant. À l'arrêt, dès que le sélecteur se trouve sur *V-R*, la roue libre contenue dans le plateau bloqué par l'embrayage *C* s'oppose au recul de la voiture, dans une montée, par exemple. Dès que le véhicule a démarré, l'embrayage *C'* est également alimenté (réduction : 0,658).

3° *Troisième vitesse.* — Les embrayages *A* et *B* sont tous deux alimentés ; les éléments de l'ensemble du train sont solidarisés les uns avec les autres : c'est la prise directe. Il est bien évident que la boite de vitesses épicycloïdale et le convertisseur de couple remplissent chacun leur office d'adaptation de couple, la boite mécanique n'ayant pour rôle que de compléter le domaine d'adaptation un peu trop étroit du convertisseur.

4° *Marche arrière.* — Les embrayages *B* et *D* sont alimentés ; le mouvement est transmis par le planétaire 2. Le porte-satellites du train étant immobilisé par rapport au carter il y a inversion du sens de rotation de 2 et la couronne entraîne le véhicule en marche arrière. Le tableau suivant peut résumer le fonctionnement mécanique de la boite :

	Embrayages					Porte-satellites 5
	A	*B*	*C*	*C'*	*D*	
Point mort	0	0	0	0	0	0
1re vitesse *V-R.*	*X*	0	0	0	*X*	⌒
1re vitesse exceptionnelle	*X*	0	0	0	●	●
2e vitesse	*X*	0	■	●)	0	⌒
3e vitesse	*X*	*X*	0	0	0	*X*
Marche arrière	0	*X*	0	0	●	●

0 libre
X solidarisé tournant
● solidarisé par rapport au carter
⌒ rotation autorisée dans un seul sens
■ solidarisé par rapport au carter après le démarrage

4.3.3. Fonctionnement hydraulique. — Une pompe à huile, entraînée par le volant du moteur, assure les rôles suivants :

— le graissage de la boîte,

— le remplissage du convertisseur de couple,

— le fonctionnement du système de servocommande.

La pression de l'huile est réglée par un clapet de décharge et ne varie pas en fonction du régime du moteur. Les deux premiers rôles n'appellent pas d'explications complémentaires. À l'inverse, le troisième rôle demande une description détaillée. On peut distinguer :

1° *Le régulateur centrifuge.* — Lié à l'arbre de sortie de la boîte de vitesses et donc aux roues motrices, le régulateur permet d'obtenir, à partir de la pression principale, une pression d'huile croissant avec la vitesse du véhicule suivant une loi déterminée par le constructeur en fonction des caractéristiques du moteur et du véhicule.

2° *Le bloc de commande.* — Il est le véritable cerveau de l'automaticité. On y distingue :

— *Le tiroir de sélection.* — Manœuvré par le conducteur du véhicule à partir d'une commande placée sous le volant, le tiroir permet d'enregistrer les intentions du pilote. Celles-ci sont transformées en pressions d'huile qui achemineront les ordres d'exécution aux différents organes concernés. Ce tiroir peut occuper un certain nombre de positions (six dans le cas du modèle équipant la 504).

N (neutral) Point mort.

P Parking (la différence entre cette position et la position *N* réside dans un blocage mécanique de l'arbre de transmission qui immobilise la voiture).

A R Position de marche arrière.

A ou *V-R* Position de commande automatique sans asservissement.

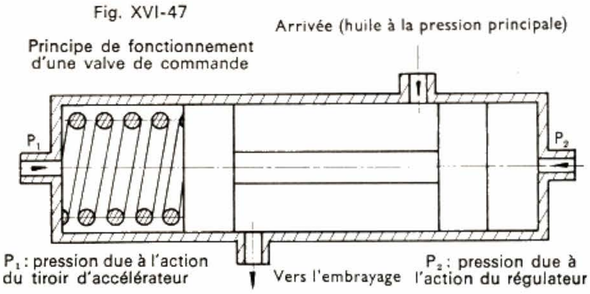
2, 1 Dans ces deux positions, remplacées par la position *E* (exceptionnelle) dans la 404, un asservissement hydraulique retarde ou bloque le passage des combinaisons supérieures.

— *Le tiroir d'accélérateur.* — Lié à la tringlerie de l'accélérateur, ce tiroir a pour rôle d'élaborer une pression croissant avec l'appui sur l'accélérateur ; elle sera utilisée comme élément d'information pour le passage des vitesses.

— *Les valves de commande.* — Deux valves de commande, agissant l'une pour le passage de la première à la deuxième et l'autre pour le passage de la deuxième à la troisième, sont en fait des robinets automatiques qui permettent « l'acheminement » de l'huile à la pression principale vers les embrayages *B*, *C'*, *C* et *D*, l'embrayage *A* étant alimenté directement à partir du tiroir de sélection. Le schéma XVI-47 montre que l'automaticité du fonctionnement est obtenue à partir des deux pressions antagonistes obtenues : l'une à partir du tiroir d'accélérateur et tendant à retarder le passage vers la combinaison supérieure, l'autre à partir du régulateur centrifuge et tendant à provoquer le passage vers la combinaison supérieure. Le point de fonctionnement de la valve (et donc celui du passage de la vitesse) dépend également de la poussée exercée par un ressort taré, poussée qui s'oppose à celle exercée par la pression du régulateur. En conclusion et à l'image des manœuvres faites par un conducteur, en conduite normale ou en conduite sportive, dans la boîte les passages de vitesses se font à une vitesse de la voiture d'autant plus grande que le conducteur appuie davantage sur l'accélérateur. De la même façon, en vitesse dite de croisière, le fait d'appuyer à fond sur l'accélérateur entraîne la rétrogradation de la boîte dans la combinaison inférieure compatible avec la vitesse de la voiture. En montagne ou en parcours difficile, les asservissements réalisés qui bloquent le passage, soit en seconde, soit en troisième vitesse, permettent d'utiliser le frein-moteur en descente, alors que l'accélération due à la pente tendrait à provoquer le passage dans les combinaisons supérieures. Le schéma XVI-48 donne la disposition des organes et leurs liaisons hydrauliques en deuxième vitesse *V-R* dans le cas de la 404.

Fig. XVI-47

Principe de fonctionnement d'une valve de commande



P_1 : pression due à l'action du tiroir d'accélérateur — Vers l'embrayage — P_2 : pression due à l'action du régulateur

5. EMPLACEMENT DES BOÎTES DE VITESSES

De nombreuses dispositions ont été essayées avec des succès divers. Nous allons tenter d'en faire le tour en dégageant les avantages et inconvénients de chacune d'elles.

5.1. Roues arrière motrices

5.1.1. Boîte indépendante :

— *Entre moteur et pont.* — Cette disposition a été essayée tout au début de l'automobile. La boîte de vitesses était en fait située sous le siège du conducteur et était manœuvrée par un levier situé sur le côté du véhicule en dehors de celui-ci. Elle nécessitait un arbre de transmission entre embrayage et boîte, et généralement des flectors ou cardans pour tenir compte du fait qu'un châssis n'est jamais totalement indéformable. De plus, la multiplication du couple qui prend naissance dans la boîte donne naissance à un couple de réaction qui impose des efforts aux appuis sur le châssis en sens inverse du couple moteur.

— *Sur le pont arrière.* — Ce système se rencontre sur certaines voitures récentes (Lancia). Le pont et la boîte sont alors fixés au châssis et constituent un ensemble suspendu. En dehors de l'avantage que constitue la compacité de l'ensemble boîte-pont, les inconvénients rencontrés sont ceux signalés dans le système précédent. Les grandes vitesses de rotation des moteurs actuels nécessitent un équilibrage très soigné de l'arbre de transmission. De plus, le dispositif de commande de la boîte offre quelques difficultés de réalisation car il doit être facile à manœuvrer tout en étant précis.

5.1.2. Bloc moteur. — Dès la fin de la guerre 1914-1918, le système du bloc moteur a fait son apparition et son succès ne s'est pas démenti. Il allie en effet la compacité la plus grande à une bonne protection des organes. La boîte de vitesses peut être placée immédiatement en avant et au-dessous de l'habitacle de conduite, ce qui permet une très bonne facilité de commande de la boîte, soit par levier direct au plancher, soit par une tringlerie relativement simple. De plus, le couple de réaction est absorbé par la liaison entre le carter moteur et le carter de boîte sans transmission d'efforts extérieurs aux organes d'appui sur le châssis. La presque totalité des véhicules à moteur avant et à roues motrices arrière utilisent cette disposition.

5.2. Roues avant motrices. — Ce système, appelé couramment « traction avant » se rencontre en trois versions.

5.2.1. Moteur situé en avant de la boîte (2 CV, 3 CV Citroën). — Cette disposition est surtout employée pour les moteurs à refroidissement direct (refroidissement à air). Il permet en effet d'avoir la turbine de circulation en avant du moteur avec écoulement direct du fluide de refroidissement vers les cylindres disposés en « flat-twin » (à plat). Cette disposition n'est possible qu'avec des moteurs très courts pour une raison d'équilibrage des masses. La boîte reste très près de l'habitacle et sa commande est très facile.

5.2.2. Moteur en arrière de la boîte (Citroën DS, ID, première traction avant ; Renault R 4, R 16, R 6, R 12). — Dans ces réalisations, les moteurs sont en ligne et leur longueur ainsi que leur masse interdisent de les monter en avant de l'axe de l'essieu avant. Cet essieu serait chargé de façon exagérée et, de plus, la répartition des masses influerait fâcheusement sur la tenue de route. À l'inverse, la commande de la boîte est un peu plus compliquée que dans le système précédent.

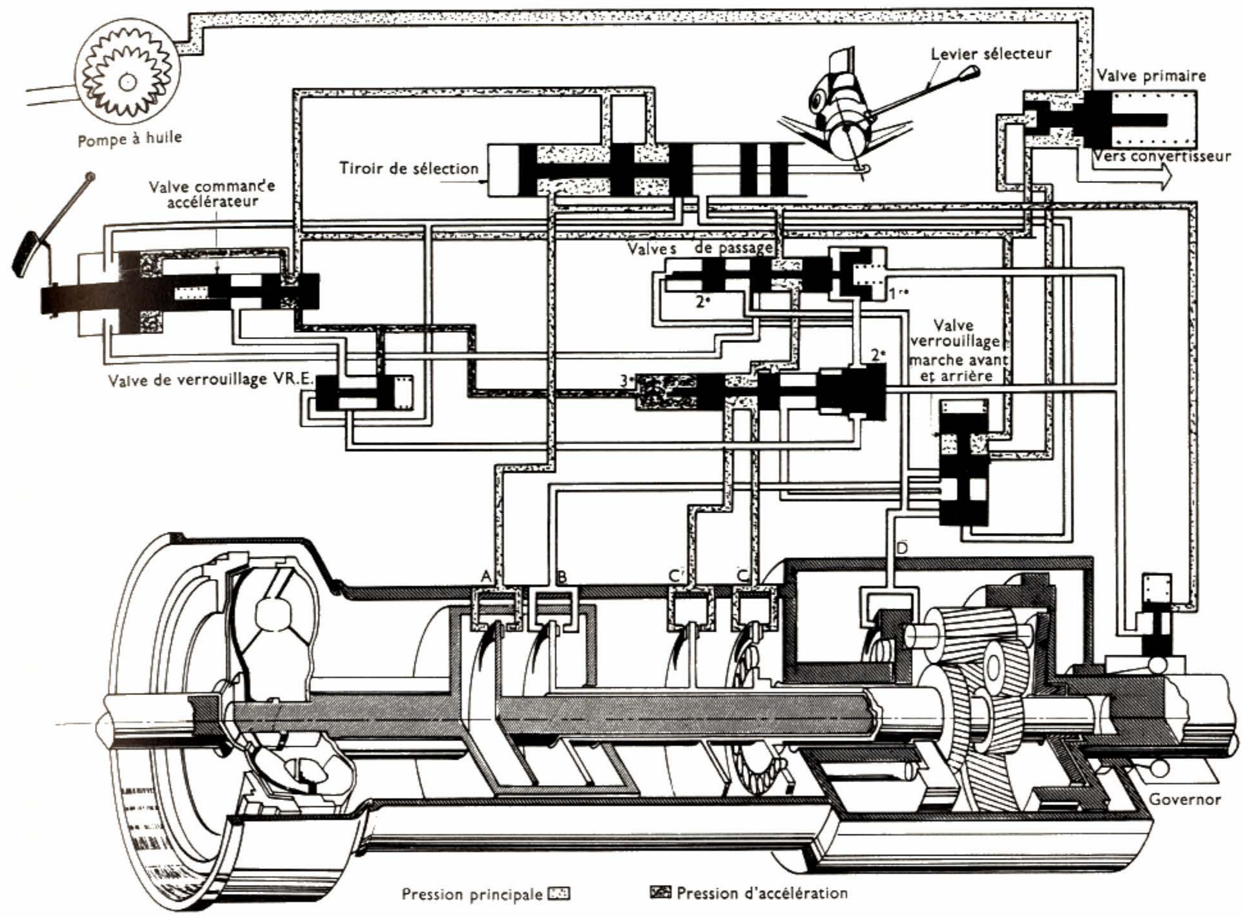


Fig. XVI-48 — Schéma hydraulique de la boîte ZF

5.2.3. Disposition transversale du moteur et de la boîte. — Apparue pour la première fois sur les voitures anglaises Austin et Morris, cette disposition a été reprise en France par Peugeot, d'abord sur la 204, puis sur la 304, et par Simca avec la 1100. La boîte de vitesses et le démultiplicateur sont placés dans le carter du moteur, immédiatement à côté du moteur lui-même avec un graissage commun. L'un des demi-arbres doit passer sous le moteur, au travers de la boîte de vitesses. En contrepartie, cette réalisation permet un gain appréciable sur la longueur de la voiture, et une bonne répartition des masses. Elle permet de plus un meilleur rendement de transmission par la suppression du renvoi d'angle; la démultiplication est obtenue par un train d'engrenages silencieux à taille hélicoïdale. Elle complique cependant l'entraînement du ventilateur de refroidissement dont la courroie doit travailler dans deux plans perpendiculaires. Les formes de carrosseries actuelles qui tendent à l'obtention d'un meilleur maître-couple imposent une position inclinée du moteur de l'avant vers l'arrière, position qui favorise l'accessibilité aux divers organes du moteur (bougies, carburateur, alternateur, allumeur, etc.).

5.3. Moteur arrière

5.3.1. Roues arrière motrices

1° *Disposition transversale.* — Elle a souvent été utilisée sur certaines voitures de compétition, et aussi sur certains modèles N.S.U.

2° *Moteur en arrière de la boîte.* — Les voitures Renault (Dauphine, R 8 et R 10) ont utilisé la solution du moteur à l'extrême arrière, la boîte étant située en avant de l'essieu. La répartition des masses n'est pas idéale car le porte-à-faux du moteur crée, dans certaines circonstances, des diminutions d'adhérence du train avant. Le radiateur est situé à l'arrière de la voiture et le refroidissement exige, toutes choses égales par ailleurs, un peu plus de puissance que lorsqu'il est placé à l'avant dans le courant d'air dû au déplacement du véhicule.

3° *Moteur en avant de la boîte.* — Les Alpine-Renault et les véhicules Matra offrent la disposition inverse avec le moteur situé en avant de l'essieu arrière. La répartition des masses est beaucoup plus satisfaisante mais le refroidissement offre les mêmes inconvénients. L'insonorisation de la voiture et son habitabilité se ressentent de la situation centrale du moteur.

5.3.2. Roues avant motrices. — Cette disposition n'est pas utilisée. Elle offre à peu près tous les inconvénients des formules précédentes, sans apporter d'avantages notables. De plus, elle fait perdre l'un des avantages majeurs du moteur avant et des roues avant motrices, c'est-à-dire l'absence de tunnel pour l'arbre de transmission et la possibilité de réaliser un plancher plat dans l'habitacle.

CHAPITRE XVII

TRANSMISSION

1. GÉNÉRALITÉS

À partir de la sortie de la boîte de vitesses, le mouvement est transmis aux roues par l'intermédiaire d'un ensemble d'organes plus ou moins complexe, en fonction :

— des dispositions respectives du moteur et des roues motrices,
— du mode d'acheminement de la puissance.

Ce système reçoit le nom général de transmission. On distingue :

— les transmissions purement mécaniques,
— les transmissions électriques,
— les transmissions hydrauliques.

2. TRANSMISSIONS MÉCANIQUES

Les transmissions mécaniques comprennent :

— Un arbre de transmission qui n'existe que dans les versions où le moteur est à l'avant du véhicule et les roues motrices à l'arrière.
— Un renvoi d'angle, qui joue également le rôle de démultiplicateur.

Dans les systèmes à moteur transversal seul ce dernier rôle est rempli.

— Un organe, appelé différentiel, permettant aux roues motrices de recevoir des couples égaux tout en autorisant une différence de vitesses de rotation de ces roues (ainsi, en virage, il est possible de leur faire décrire des cercles de rayons différents).
— Deux demi-arbres situés entre le différentiel et les roues motrices.

Dans le cas où les roues sont à la fois motrices et directrices (cas des « traction avant »), ces derniers arbres comportent des joints déformables permettant le débattement de direction des roues.

Le renvoi d'angle, le différentiel et les demi-arbres peuvent être réunis dans un organe unique, appelé le « pont ».

2.1. Arbre de transmission. — L'arbre de transmission a pour rôle essentiel de transmettre le couple maximal délivré par l'ensemble moteur-boîte de vitesses (lié au châssis de façon plus ou moins rigide) à un dispositif qui, comme nous l'avons rappelé plus haut, peut être fixé également au châssis ou encore constituer un organe non suspendu directement lié aux roues.

Même dans le premier cas, le plus favorable, une certaine « liberté » est indispensable pour permettre à l'arbre de s'adapter en permanence à deux organes dont les positions respectives ne sont pas invariables.

Dans le second cas, où l'un des organes suit les débattements de la suspension, les mouvements respectifs sont plus importants. L'arbre est donc conçu pour autoriser :

— une variation angulaire permise par un ou deux joints déformables,
— une variation linéaire autorisée par un emmanchement à cannelures.

2.1.1. Arbre proprement dit. — Pour des raisons de résistance à la torsion, l'arbre doit avoir un diamètre suffisant, sans pour autant présenter un poids trop important. C'est pourquoi il se présente sous forme tubulaire. Il est réalisé en acier à haute résistance et reçoit, par soudure, à l'une de ses extrémités la partie mâle de l'emmanchement à cannelures, à l'autre l'un des composants du joint déformable.

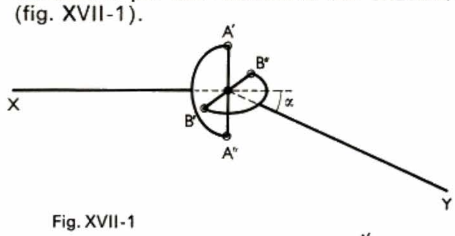
Dans le cas où la distance entre la boîte et les roues motrices est importante, l'arbre peut être scindé en deux ou plusieurs sections guidées à chacune de leurs extrémités par un palier intermédiaire porté par une traverse.

2.1.2. Joints déformables

1° *Généralités.* — On distingue :

a) *les joints de cardan* (ou encore à la Cardan, du nom de leur inventeur). — Dans son principe, un joint de cardan se compose :

— d'une fourche solidaire de l'arbre entraînant,
— d'une seconde fourche semblable montée sur l'arbre entraîné et dont le plan fait avec celui de la première un angle de 90°,
— d'un croisillon cruciforme, dont chacune des branches tourillonne par ses extrémités sur chacune des fourches (fig. XVII-1).



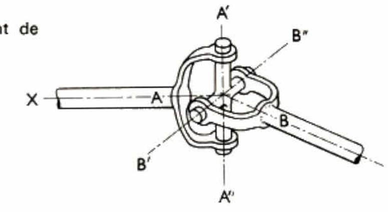
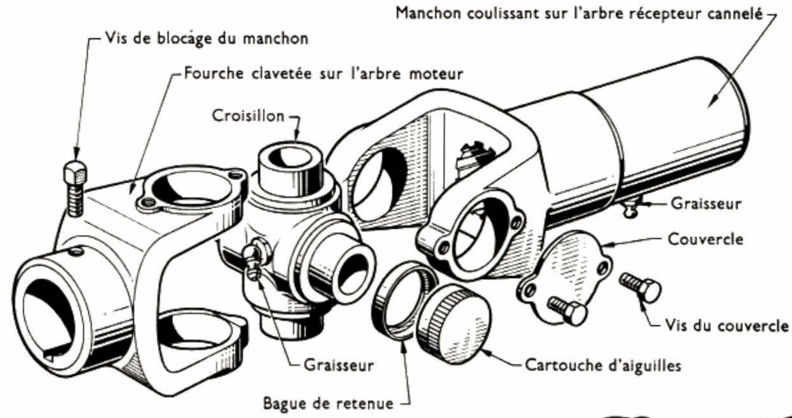


Fig. XVII-1

Principe du joint de cardan

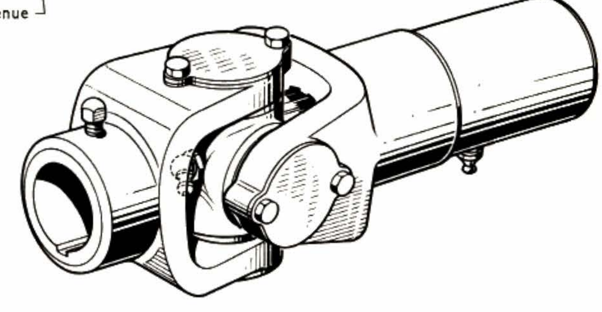
Fig. XVII-2

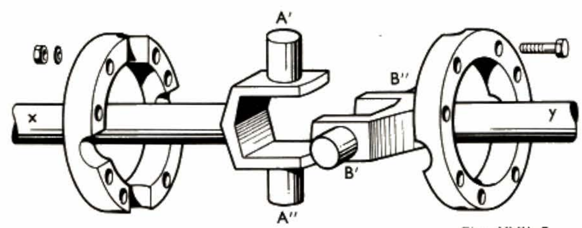
Joint à croisillon simple



Vue éclatée

Ensemble





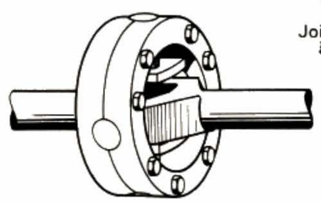
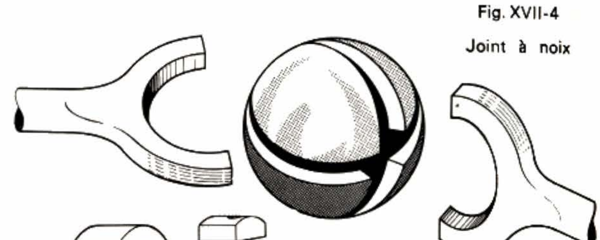


Fig. XVII-3

Joint de cardan à couronne

Fig. XVII-4

Joint à noix



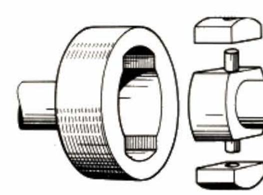


Fig. XVII-5 — Cardan à dés coulissants

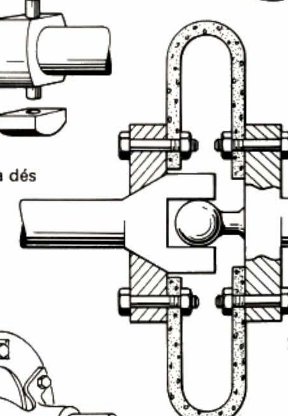
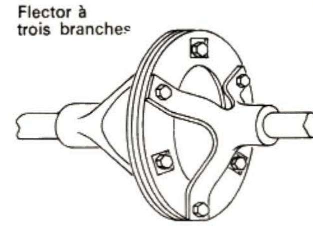


Fig. XVII-7

Joint Panhard

Fig. XVII-6

Flector à trois branches



Les joints de cardan les plus connus sont:
— le joint à aiguilles à croisillon simple (fig. XVII-2),
— le joint à couronne (fig. XVII-3),
— le joint à noix (fig. XVII-4),
— le joint à dés coulissants (fig. XVII-5).

b) *les joints élastiques*. — Ces joints ne sont plus utilisés que pour transmettre d'assez faibles couples. On peut citer:

— les *flectors* (fig. XVII-6) dans lesquels l'organe déformable est constitué par un disque en tissu caoutchouté et armé;

— le joint *Panhard* dans lequel l'organe déformable est encore à base de tissu caoutchouté mais qui présente un meilleur guidage; une rotule assure en effet un point commun d'articulation aux axes des deux arbres (fig. XVII-7).

2° *Conditions de mouvement homocinétique*. — Les joints qui viennent d'être décrits ne peuvent assurer une transmission uniforme du mouvement, dès que les axes ne sont plus alignés. L'arbre menant et l'arbre mené ont la même vitesse moyenne, mais les vitesses instantanées ne sont rigoureusement égales qu'à chaque demi-tour. Si α est l'angle formé par les deux arbres, et si la vitesse de l'arbre menant est uniforme et égale à ω, la vitesse ω' de l'arbre mené varie suivant le tableau suivant:

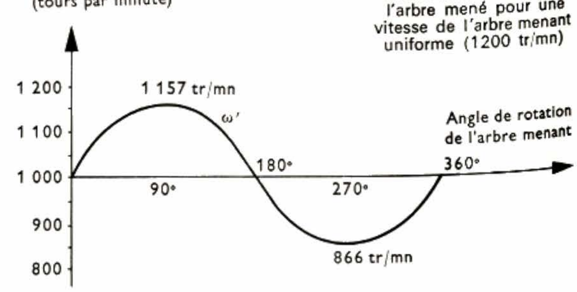
Angle de rotation de l'arbre menant	0	90°	180°	270°	360°
Angle de rotation de l'arbre mené	0	$\frac{90°}{\cos \alpha}$	180°	$270° \cdot \cos \alpha$	360°
Écart de vitesse	0	+	0	—	0

Les vitesses instantanées de l'arbre mené par rapport à celui de l'arbre menant peuvent se traduire par la courbe de la figure XVII-8 pour $\omega = 1\,000$ tr/mn et $\alpha = 30°$.

Ce défaut peu sensible pour les angles assez faibles des deux arbres devient rapidement très gênant dès que α atteint 30° ($\cos 30° = 0{,}866$).

Fig. XVII-8

Variation de la vitesse instantanée ω' de l'arbre mené pour une vitesse de l'arbre menant uniforme (1200 tr/mn)



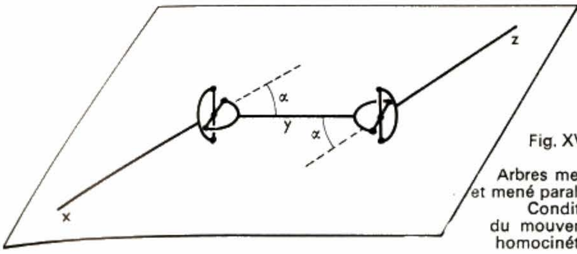


Fig. XVII-9

Arbres menant et mené parallèles
Conditions du mouvement homocinétique

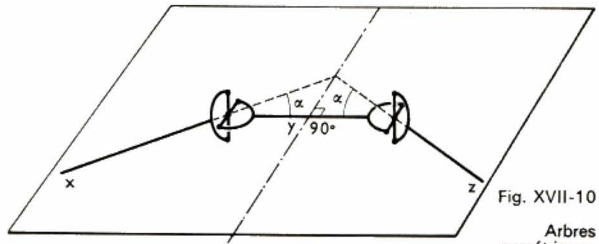


Fig. XVII-10

Arbres symétriques

Quand il s'agit de roues avant motrices ayant des angles de braquage différents et de sens contraire par rapport au demi-arbre, la conduite devient très vite inconfortable en virage serré. C'était le cas des premiers modèles de 2 CV Citroën. Cet inconvénient peut être annulé si l'on emploie la combinaison de deux joints de cardan et d'un arbre intermédiaire à la double condition suivante:

— les arbres menants et menés sont parallèles ou symétriques par rapport à un plan bissecteur perpendiculaire élevé au milieu de l'arbre intermédiaire;

— les axes homologues des croisillons doivent être dans un même plan (fig. XVII-9 et XVII-10).

3° *Joints homocinétiques.* — Le véhicule à « traction avant » a nécessité la réalisation de joints compacts et permettant des angles de braquage importants. Des progrès appréciables ont été réalisés dans ce domaine et les « traction avant » modernes ont des rayons de braquage comparables à ceux des voitures à propulsion arrière. Dans leur principe, les joints homocinétiques réalisent les conditions de symétrie de la figure XVII-10; en particulier la coïncidence des deux axes dans une pièce formant plan bissecteur et matérialisant l'arbre intermédiaire. La coïncidence des deux axes est généralement réalisée par un guidage interne à rotule; les organes de guidage des arbres ne participent pas à la transmission du couple moteur qui est effectuée par des dispositifs indépendants. Toutefois, dans les cardans à billes, il n'y a pas de séparation entre les deux fonctions. On peut distinguer:

— le joint Tracta à double noix (fig. XVII-11),

— le joint Spicer-Glaenzer à double croisillon (fig. XVII-12),

— le joint Rzeppa à billes (fig. XVII-13),

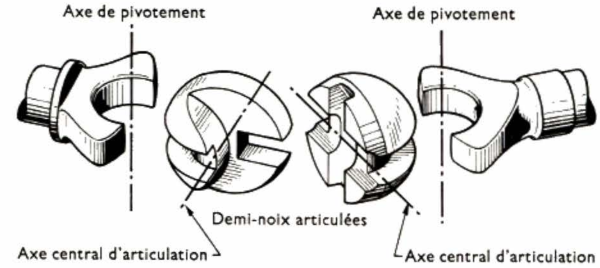
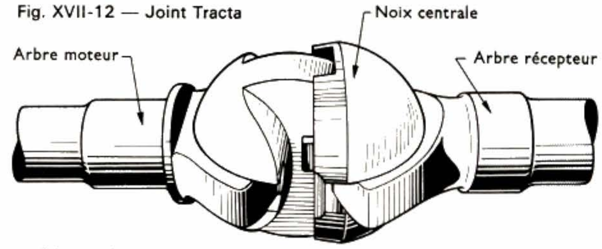


Fig. XVII-12 — Joint Tracta



a

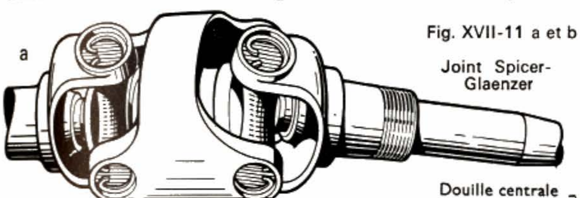
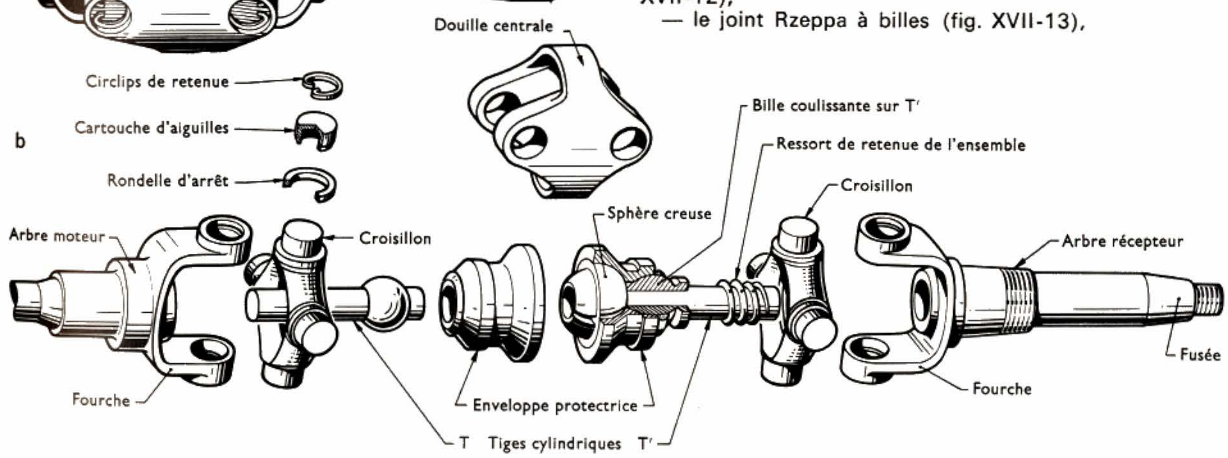


Fig. XVII-11 a et b

Joint Spicer-Glaenzer

b



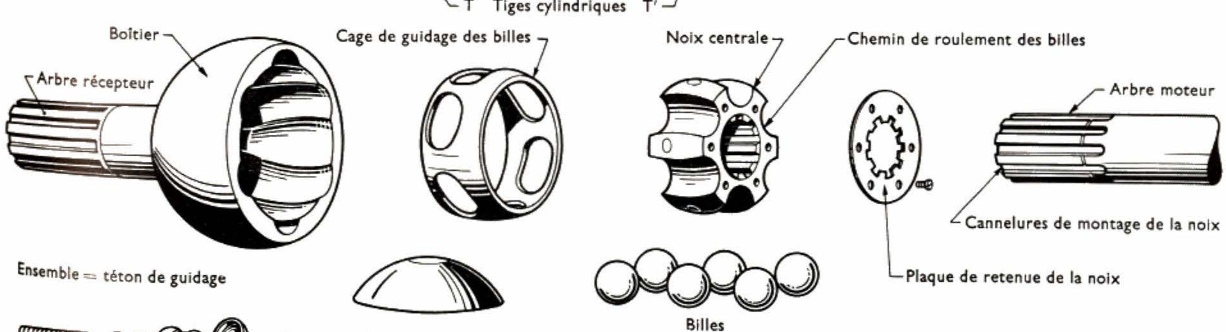


Fig. XVII-13

Joint Rzeppa

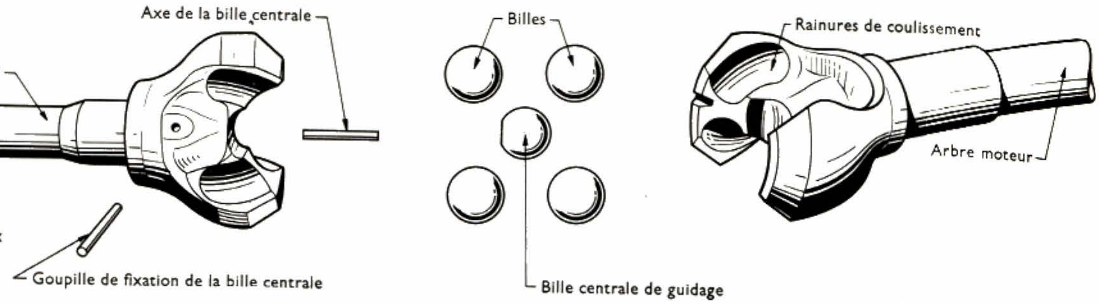


Fig. XVII-14

Joint Bendix

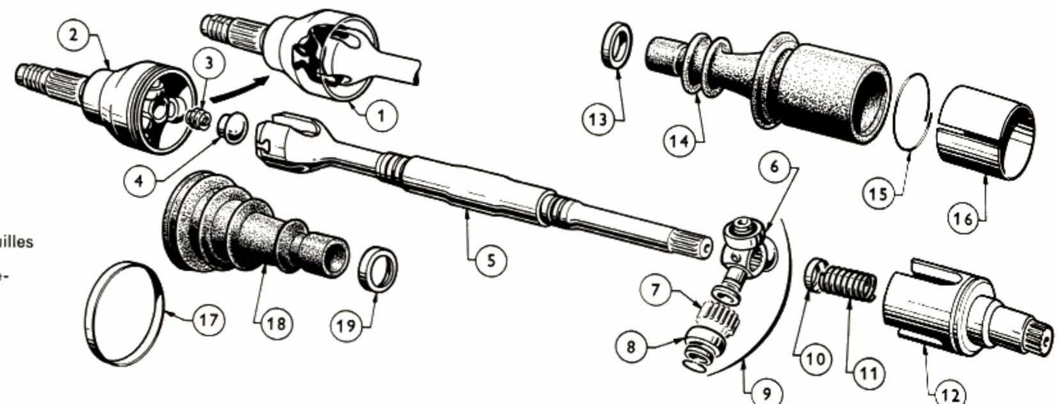


Fig. XVII-15

Joint tripode

1. Joint assemblé
2. Fusée
3. Ressort
4. Poussoir
5. Tube
6. Tripode
7. Roulement à aiguilles
8. Galet
9. Ensemble tripode-galet-aiguilles
10. Cuvette
11. Ressort
12-13. Bracelet
14. Soufflet
15. Circlips
16. Capot
17. Anneau
18. Soufflet
19. Bloc

— le joint Bendix-Weiss à billes (fig. XVII-14),
— le joint Tripode G.I. de Spicer-Glaenzer (fig. XVII-15),
— le joint Bouchard (fig. XVII-16).

Les trois derniers modèles autorisent un déplacement longitudinal des deux extrémités du joint, ce qui permet de supprimer un emmanchement à cannelures.

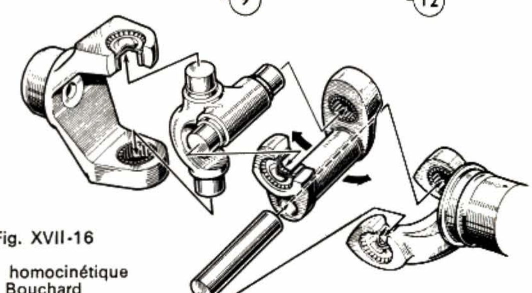


Fig. XVII-16

Joint homocinétique Bouchard

2.2. Renvoi d'angle. — Le renvoi d'angle a un double rôle :

— transformer le mouvement d'un arbre contenu dans le plan médian du véhicule ou parallèle à celui-ci en un mouvement perpendiculaire à ce plan (les moteurs transversaux ne possèdent pas de renvoi d'angle) ;

— assurer une démultiplication adaptée à la vitesse de rotation et à la puissance du moteur, à la circonférence utile des pneumatiques, au poids du véhicule et aux performances recherchées.

Malgré la tendance vers l'emploi de jantes et de pneumatiques de diamètre plus faible, les vitesses de rotation des roues motrices ne doivent pas dépasser 1 000 à 1 200 tr/mn.

Une roue courante de véhicule de tourisme développe 2 m par tour, ce qui représente une vitesse du véhicule de 120 km/h pour 1 000 tr/mn.

L'arbre de sortie de la boîte tournant en prise directe à la vitesse du moteur, c'est-à-dire dans les véhicules modernes classiques de 5 000 à 8 000 tr/mn, on conçoit donc la nécessité d'une démultiplication variant entre 8 et 5 à 1.

Ces démultiplications sont exprimées ordinairement par le rapport du nombre de dents des engrenages du renvoi d'angle ou du démultiplicateur. Deux systèmes sont utilisés pour constituer le renvoi d'angle :

2.2.1. Le système vis sans fin-couronne. — Utilisé par Peugeot jusqu'à ces dernières années, ce dispositif est en voie de disparition. Il demande en effet un usinage très soigné et un graissage de qualité car les pressions spécifiques sont élevées. La vis est généralement usinée en acier alors que la couronne est en bronze. Seule la disposition « vis en dessous » a été utilisée sur les voitures de tourisme, ce qui permet d'abaisser l'arbre de transmission (fig. XVII-17). Pour des raisons de prix de revient, et malgré les avantages présentés par la vis globique, on a eu généralement recours à des systèmes à vis cylindrique (ou vis tangente). Le

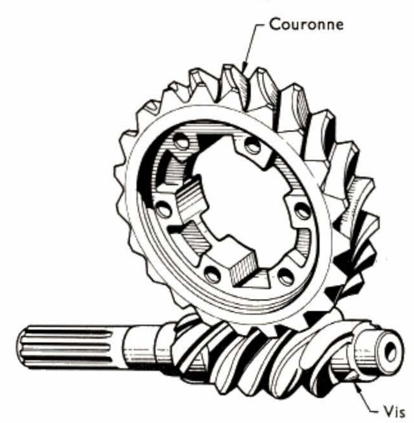


Fig. XVII-17

Couple à vis sans fin

rendement du couple vis tangente-couronne est, à démultiplication égale, inférieur à celui des couples coniques que nous allons étudier. De plus, la nécessité d'avoir un système réversible restreint les possibilités de démultiplication. On utilise généralement un angle d'inclinaison des filets voisin de 40°. La démultiplication obtenue est égale au rapport entre le nombre de filets de la vis (toujours très faible : généralement un à trois filets) et le nombre de dents de la couronne.

2.2.2. Le système du couple conique. — On appelle couple conique un ensemble de deux engrenages coniques, c'est-à-dire dont les dents sont réparties sur les génératrices d'un cône. Les axes des deux arbres sont, dans la très grande majorité des cas, perpendiculaires. Ces axes peuvent se couper et, dans ce cas, les sommets des cônes

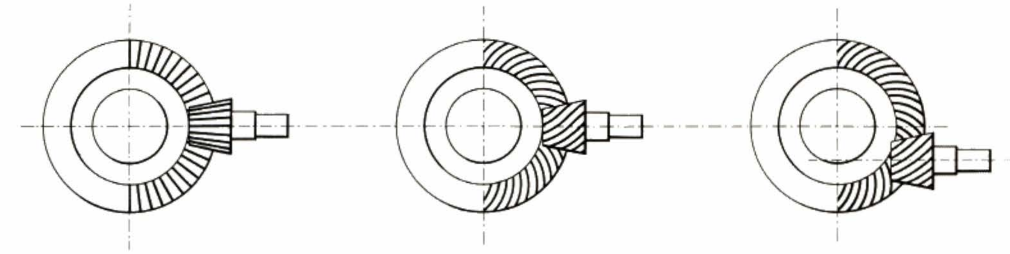


Fig. XVII-18

Types d'engrenages coniques

a. Denture droite — b. Denture Gleason — c. Couple hypoïde

générateurs sont confondus. Si au contraire les axes sont décalés d'une certaine quantité, le couple est du type hypoïde.

1° *Couple conique* (fig. XVII-18 a) *à axes concourants.* — Les dentures droites utilisées au début de l'automobile ont fait place à des dentures inclinées plus robustes et moins bruyantes.

Elles offrent en effet l'avantage d'avoir plusieurs dents en prise, ce qui donne un engrènement continu analogue à celui des pignons à taille hélicoïdale dont nous avons fait mention dans le chapitre consacré aux boîtes de vitesses (fig. XVII-18 b). La denture la plus utilisée est la taille spirale, obtenue sur machine Glaeson. Chaque dent est théoriquement formée par un segment d'une spirale tracée sur le cône générateur de l'engrenage. Dans la pratique et devant les difficultés d'usinage, la portion de spirale est remplacée par un arc de cercle qui donne à la dent un fonctionnement pratiquement aussi avantageux que celui obtenu avec la taille spirale.

2° *Couple hypoïde* (fig. XVII-18 c). — Le décalage des arbres permet, comme dans le cas du système à vis par en dessous, d'abaisser l'arbre de transmission. Le décalage des arbres ou « offset » peut atteindre 30 à 35 % du diamètre de la couronne. Cette disposition permet en outre une réduction importante sous un faible volume (jusqu'à 1 à 8). Les dentures des engrenages sont taillées pratiquement sur des cônes générateurs peu différents des hyperboloïdes, surfaces géométriques théoriques qui ont donné leur nom au couple hypoïde. Elles sont soit du type Gleason décrit plus haut soit encore du type Palloïde-Klingelnberg. Le rendement de ces couples est un peu inférieur à celui des couples à axes concourants.

2.2.3. Double démultiplication. — Sur certains ponts de poids lourds, une démultiplication supplémentaire est parfois prévue entre le renvoi d'angle et le pont lui-même. Nous avons vu, en effet, que les couples coniques ne pouvaient dépasser une certaine démultiplication sous peine d'encombrement excessif : il est parfois nécessaire de réaliser un rapport total de transmission plus important (fig. XVII-19). Cette démultiplication peut être fixe ou constituer un réducteur à deux rapports dont la commande s'effectue à partir de la cabine durant l'utilisation du véhicule. Cette disposition est en particulier intéressante pour les parcours à vide du camion et également pour les tracteurs de semi-remorques « haut le pied ». Il existe quelques rares réalisations où la manœuvre du réducteur s'effectue uniquement sur le pont lui-même avant le départ et en fonction du chargement du véhicule.

2.3. Différentiel

2.3.1. Généralités. — Nous avons vu dans les généralités que le différentiel permettait aux roues motrices de décrire en virage des cercles de rayon différent et donc d'avoir des vitesses de rotation différentes tout en recevant chacune un effort moteur égal. On peut donc dire que cet organe est un équirépartiteur du couple moteur. Le différentiel est apparu sur les véhicules automobiles vers le début du siècle dès que la voie des véhicules et leur vitesse ont été suffisamment importantes pour en faire apparaître la nécessité.

2.3.2. Réalisation de principe (fig. XVII-20). — Un différentiel est constitué par un boîtier boulonné sur la grande couronne du renvoi d'angle et sur lequel sont montés un ou deux couples de satellites. Chaque couple de satellites tourillonne sur un axe entraîné en rotation par le boîtier. Les satellites engrènent avec deux planétaires montés fous dans le boîtier et reliés chacun avec les roues motrices par un demi-arbre.

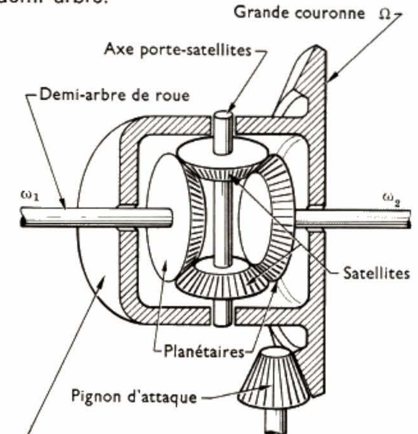


Fig. XVII-20

Réalisation de principe du différentiel

En ligne droite : $\Omega = \omega_1 = \omega_2$

En virage : $\Omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$

En patinage : $\omega_1 = 2\,\Omega$; $\omega_2 = 0$

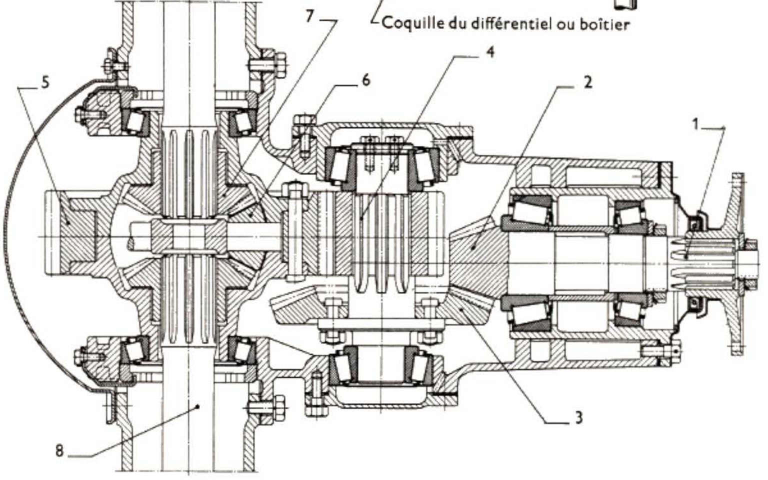


Fig. XVII-19

Pont arrière à double démultiplication

1. Arbre de transmission
2. Pignon d'attaque
3. Couronne
4. Engrenage droit solidaire de la couronne
5. Engrenage droit du différentiel
6, 7. Satellite et planétaire
8. Demi-arbre de roue

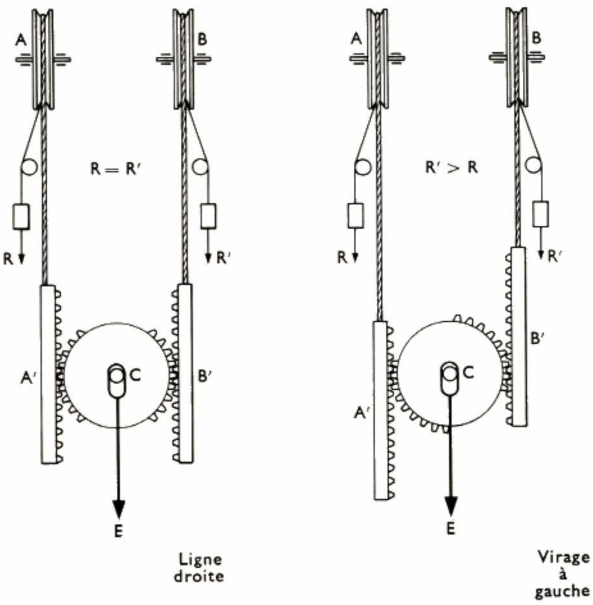


Fig. XVII-21 — Fonctionnement du différentiel

E : effort moteur au boîtier
R : couple résistant sur la roue extérieure
R' : couple résistant sur la roue intérieure
A et B : roues motrices ; A' et B' : planétaires ; C : l'un des satellites

2.3.3. Fonctionnement. — Le système satellites-planétaire peut être schématisé par l'ensemble réalisé par un pignon et deux crémaillères dentées reliées aux roues motrices (fig. XVII-21). On conçoit qu'en virage la roue motrice intérieure offre un couple résistant plus grand que la roue motrice extérieure. Celle-ci tendra donc à prendre une certaine avance sur la première. Le satellite sollicité en son centre par l'effort moteur tournera sur lui-même pour autoriser ce décalage des deux crémaillères figurant les planétaires. En ligne droite, au contraire, les satellites sont sollicités sur le diamètre en contact avec les planétaires par des résistances égales. Ils ne tournent plus sur leur axe et les planétaires ont des vitesses de rotation égales entre elles et égales à celle du boîtier. Si nous désignons respectivement par :

— ω la vitesse de la grande couronne (ou du boîtier),
— ω_d la vitesse du planétaire droit,
— ω_g la vitesse du planétaire gauche,

nous avons :

$$\omega = \frac{\omega_d + \omega_g}{2}$$

La demi-somme des vitesses des planétaires est égale à la vitesse du boîtier.

2.3.4. Inconvénients du différentiel. — Il ressort de cette dernière formule que si l'une des roues peut prendre une vitesse double de celle de la couronne, l'autre roue sera immobile. La schématisation de la figure XVII-21 montre également que le satellite peut être assimilé au fléau d'une balance ; si pour une raison quelconque (par exemple patinage de la roue sur un sol glissant ou non contact avec le sol) l'une des roues n'offre aucun couple résistant, l'autre roue ne recevra aucun couple moteur. Il pourra donc être impossible de sortir d'un passage difficile. En conduite sportive, les efforts latéraux dus aux virages pourront occasionner des pertes d'adhérence avec patinage de la roue ; or, la technique du « dérapage contrôlé » exige de pouvoir utiliser la totalité de la puissance du moteur pour conserver une trajectoire donnée. Pour remédier à ces défauts, on utilise soit :

— le système du blocage de différentiel, qui consiste à solidariser par un crabot l'un des planétaires sur le boîtier (fig. XVII-22),

— soit le système du différentiel autobloquant qui n'autorise que la seule différence de vitesse des planétaires nécessaire au virage le plus serré.

On voit sur le schéma (fig. XVII-23) que l'embrayage tend à solidariser le demi-arbre et le boîtier proportionnellement à la différence de vitesse existant entre ces deux organes. Le disque de pression est en effet entraîné par la rondelle ressort dès que le boîtier tend à prendre une certaine avance sur le demi-arbre. Les tenons extérieurs à ce disque agissant sur les rampes hélicoïdales provoquent le serrage de l'embrayage et s'opposent au patinage de la roue.

Le premier système peut être une source de danger si l'on omet de libérer le différentiel dès que l'adhérence des roues motrices est redevenue normale. La solidarisation des

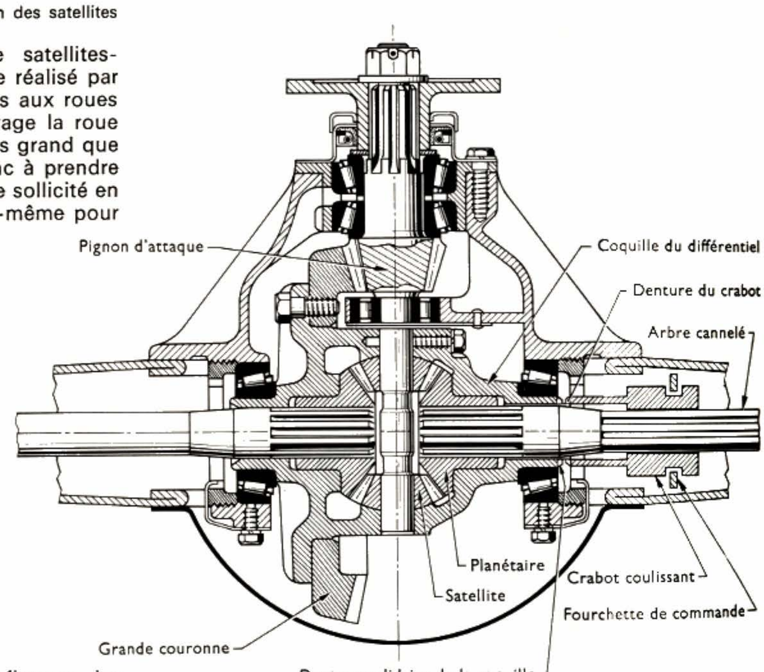


Fig. XVII-22

Blocage de différentiel

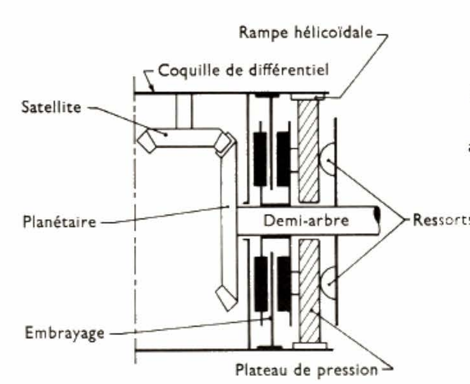


Fig. XVII-23

Différentiel autobloquant

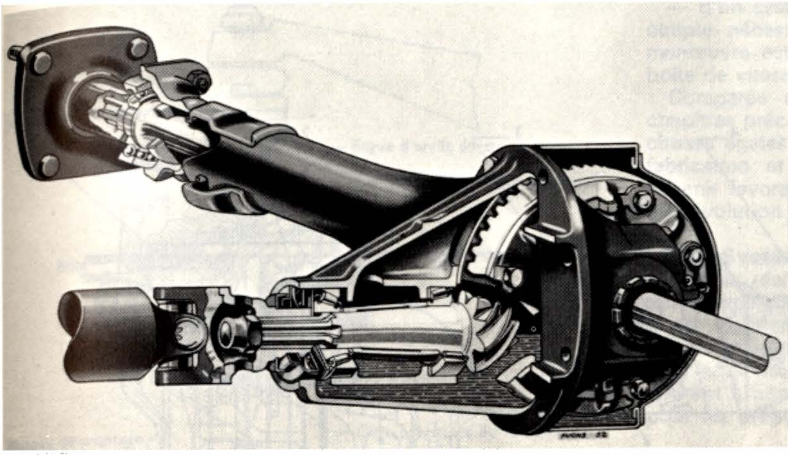


Fig. XVII-24

Pont hypoïde (*Simca*)

roues motrices peut en effet rendre délicate la conduite du véhicule et obérer la tenue de route en virage.

Le second système n'offre pas cet inconvénient; il équipe un certain nombre de voitures à vocation sportive.

2.4. Pont

2.4.1. Généralités. — On désigne ainsi l'ensemble formé par le renvoi d'angle et le différentiel, et parfois également par les demi-arbres, les freins et les moyeux supports de roues (fig. XVII-24). Le pont peut être:

— suspendu : dans ce cas, il ne comprend que les deux premiers organes et il est généralement placé dans le même carter que la boîte de vitesses, soit à l'avant, soit à l'arrière du véhicule;

— non suspendu: il est alors généralement situé à l'arrière et constitué par un boîtier renfermant le couple conique et le différentiel et par deux trompettes contenant les demi-arbres qui portent à leur extrémité les freins et les moyeux.

2.4.2. Réalisation. — Le pont est soit moulé en fonte noire ou en alliage léger nervuré, soit réalisé en tôle emboutie soudée (pont Banjo). Il doit être rigide et léger, en particulier pour les ponts non suspendus.

Le différentiel et le renvoi d'angle sont en général montés dans un « nez de pont » boulonné sur le boîtier central du pont. Une calotte en tôle emboutie réalise l'étanchéité sur l'autre côté du boîtier.

2.4.3. Montage des demi-arbres. — Dans le pont non suspendu, les demi-arbres peuvent être montés suivant trois formules différentes, selon la façon dont l'arbre travaille:

— Arbre flottant (fig. XVII-25 a) : l'arbre ne travaille qu'à la transmission du couple moteur, tous les efforts de suspension et de réaction du couple conique étant absorbés par les trompettes du pont.

— Arbre entièrement travaillant: l'arbre supporte tous les efforts ci-dessus (fig. XVII-25 b).

— Entre ces deux formules, nous pouvons avoir des solutions intermédiaires (demi-flottant (fig. XVII-25 c) ou trois quarts flottant). Le boîtier de différentiel absorbe directement les efforts de réaction du renvoi d'angle. Du côté de la sortie d'arbre, les efforts dus au poids du véhicule et aux efforts de suspension sont absorbés par un ou deux roulements.

Les dispositions entièrement « flottant » et « trois quarts flottant » sont réservées aux poids lourds et aux véhicules tout terrain. La solution « entièrement travaillant » n'est pratiquement plus employée, car l'engrènement du renvoi d'angle est difficile à assurer dans de bonnes conditions. Quand le pont est suspendu, les demi-arbres comportent un cardan en sortie de pont et parfois un autre cardan entre demi-arbre et fusée de roue (pont de Dion; V. fig. XVII-26) Dans les tractions avant, le cardan est obligatoirement homocinétique (V. § 2.1.2, 3°).

2.5. Les moyeux. — Autrefois inséparable de la roue, le moyeu fait maintenant partie intégrante du véhicule; le montage peut différer sensiblement suivant le rôle de la roue qu'il reçoit.

2.5.1. Roue motrice. — Le système par cône et clavette (fig. XVII-27 a et b) a donné d'excellents résultats. Les difficultés de démontage, surtout pour les ensembles n'ayant subi aucun démontage depuis un temps assez long, ont amené à lui préférer le montage sur cannelures avec cônes de portée ou le montage à arbre flottant (V. fig. XVII-28). Dans cette réalisation, le moyeu repose sur la portée externe d'une fusée creuse par deux roulements à billes ou à rouleaux à portée oblique. Les roulements à rouleaux, à égalité de charge, donnent des pressions spécifiques très inférieures à celles des roulements à billes ordinaires; ils permettent aussi un réglage précis et des possibilités de rattrapage des jeux fort intéressantes. Le moyeu porte généralement le tambour de frein, venu souvent de fonderie avec lui. Le demi-arbre passe par l'intérieur de la fusée et est fixé par une collerette sur la partie extérieure du moyeu.

2.5.2. Roue non motrice (fig. XVII-29). — Le moyeu est alors monté sur une fusée pleine. On y rencontre le plus fréquemment des roulements à rouleaux à portée oblique, utilisés en opposition.

3. TRANSMISSION ÉLECTRIQUE

Nous ne parlerons pas ici du véhicule électrique, mais uniquement de la transmission électrique appliquée au véhicule automobile classique, animé par un moteur à

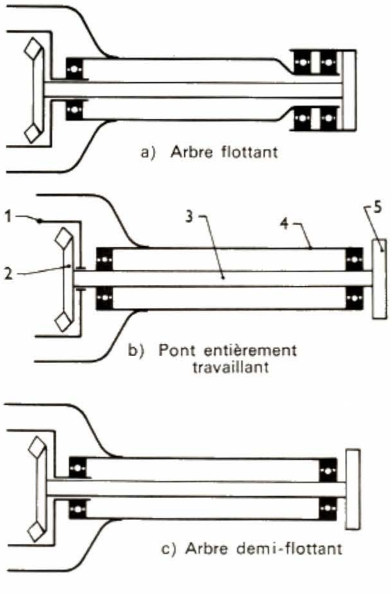


Fig. XVII-25

Montage des demi-arbres

1. Coquille de différentiel
2. Planétaire
3. Demi-arbre
4. Carter de pont (trompette)
5. Plateau de montage de la roue

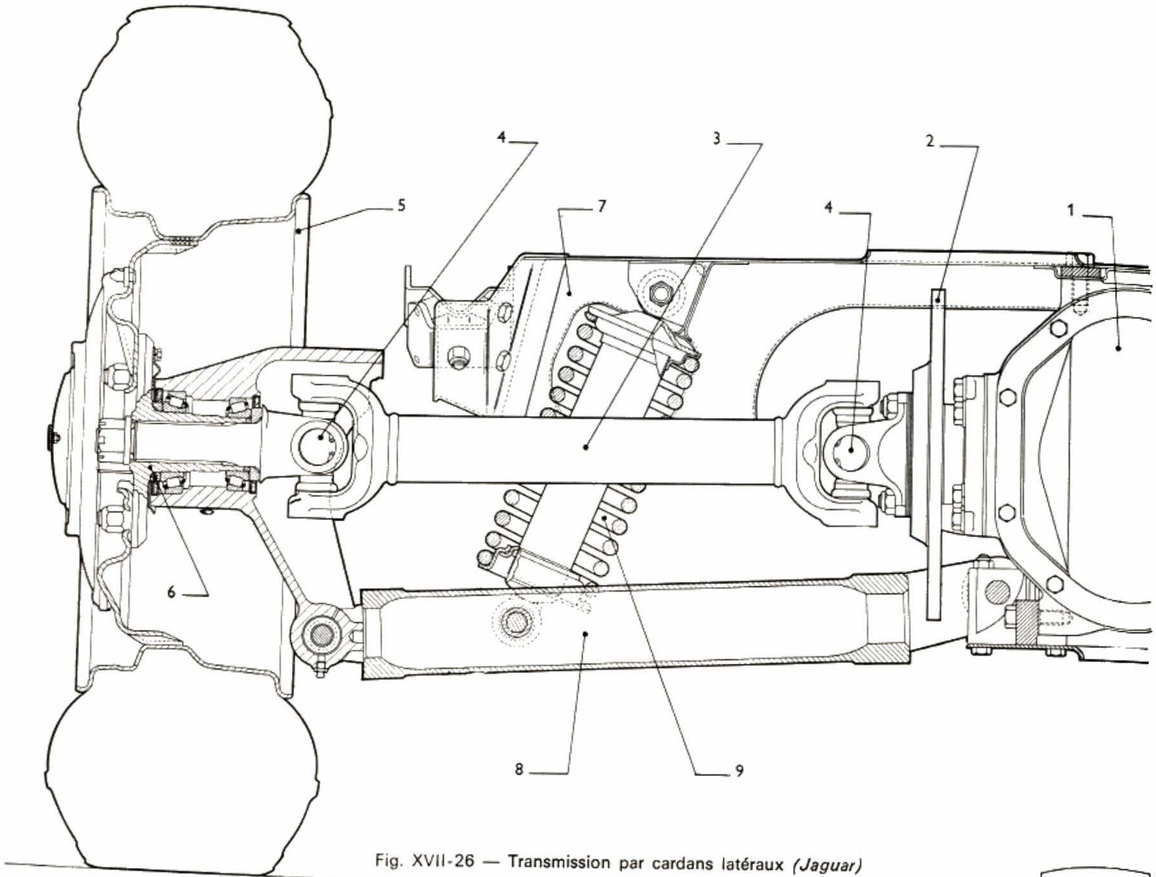


Fig. XVII-26 — Transmission par cardans latéraux *(Jaguar)*

1. Pont arrière
2. Frein à disque
3. Demi-arbre de roue
4. Cardans
5. Jante de roue
6. Moyeu
7. Châssis du véhicule
8. Bras de suspension
9. Ressort hélicoïdal de suspension

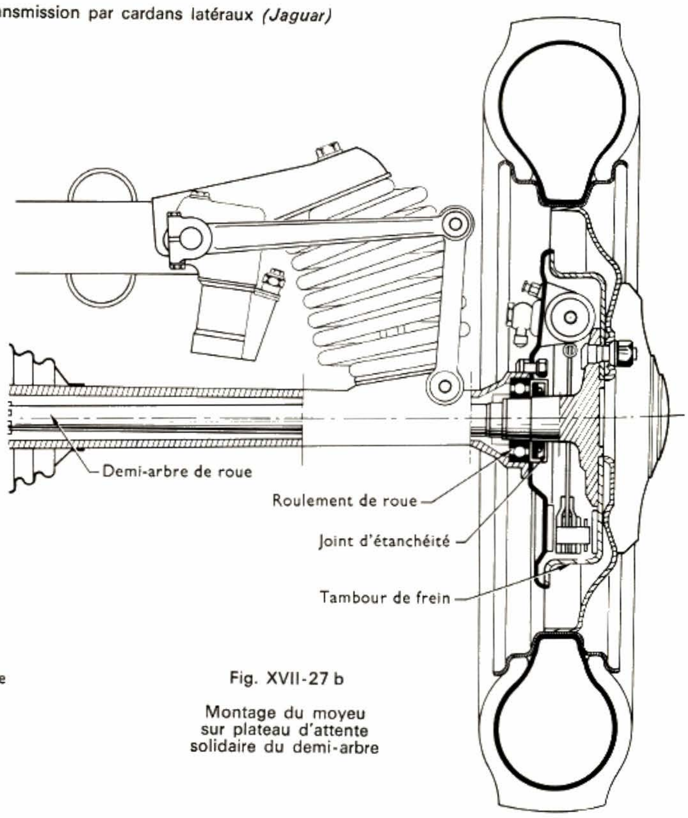
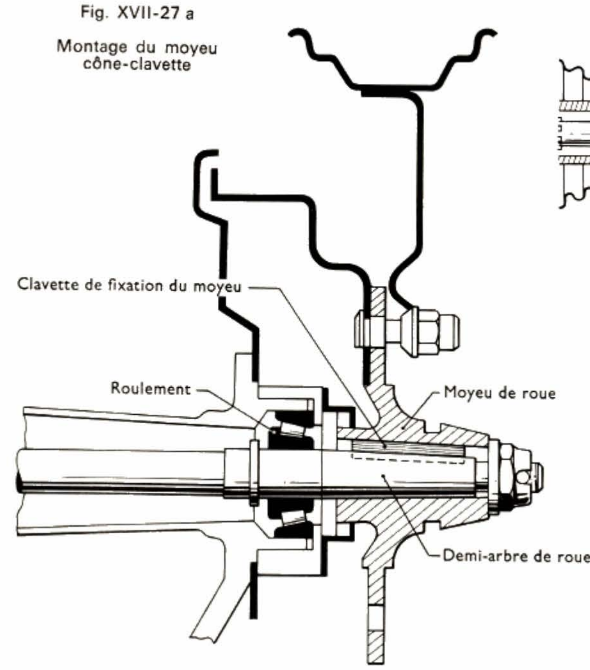


Fig. XVII-27 b

Montage du moyeu sur plateau d'attente solidaire du demi-arbre

Fig. XVII-27 a

Montage du moyeu cône-clavette



combustion interne. Ce genre de transmission est utilisé fréquemment dans la traction ferroviaire. Il a également été employé sur un poids lourd au début du siècle (véhicule électrique Crochat) et, plus près de nous, à la fin de la guerre 1914-1918, sur un char lourd de 70 tonnes: le char 2 C.

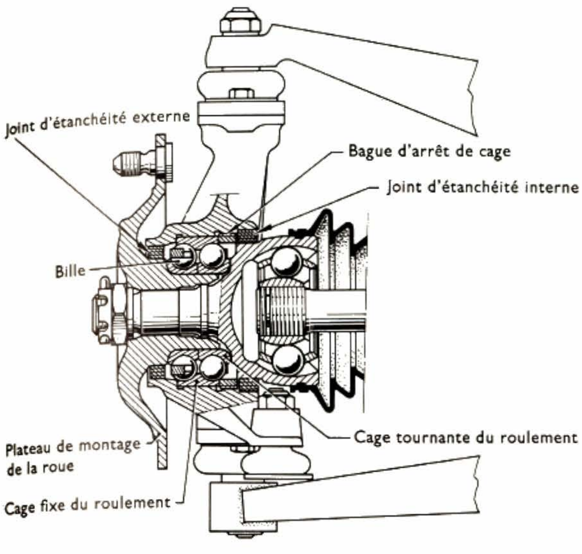


Fig. XVII-28 Montage d'une roue motrice à arbre flottant (*Citroën*)

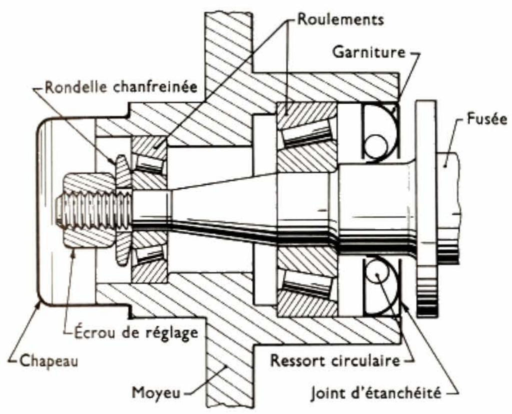


Fig. XVII-29 Montange d'une roue avant on motrice

3.1. Réalisation de principe. — Dans son principe, la transmission électrique se compose :

— d'un ensemble générateur de courant formé par une dynamo ou un alternateur entraîné par un moteur à combustion interne généralement à un régime constant.

— d'un ou plusieurs moteurs entraînant les roues soit par un système assez semblable à celui du pont arrière, soit directement et individuellement par roue en faisant alors l'économie du renvoi d'angle et du différentiel ;

— d'un système de contrôle réalisant les variations de couple nécessaires au démarrage et à la conduite. La manœuvre est facilitée par l'absence d'embrayage et de boîte de vitesses.

Comparée aux systèmes classiques décrits dans les chapitres précédents, la transmission électrique est, toutes choses égales par ailleurs, plus lourde, plus coûteuse de fabrication et d'un rendement inférieur. Le bilan peut devenir favorable sur des véhicules très lourds à l'image de l'évolution constatée dans la traction ferroviaire.

3.2. Système de génération de courant. — Les premières réalisations ont utilisé le courant continu. On tend actuellement à employer le courant alternatif triphasé. Il est maintenant possible, à partir de moyens électroniques (thyristor, thyratron, etc.) de réaliser, à partir de l'un ou l'autre des courants, des systèmes de production de courant à fréquence variable particulièrement intéressants pour les problèmes de traction.

3.3. Moteurs de traction. — *Le moteur à courant continu* a fait ses preuves en traction ferroviaire et possède encore des caractéristiques intéressantes. Il supporte facilement des surcharges de 2 ou 2,5 à 1 pendant une durée suffisante (de l'ordre de une à deux minutes) et il possède un couple de démarrage important. Des études nouvelles ont abouti à la réalisation de moteurs à courant continu à conducteurs libres, et à excitation par aimants permanents (moteur Servalco). Le rotor de ces moteurs se présente sous forme d'un disque de quelques millimètres d'épaisseur. Le collecteur est remplacé par le contact direct des balais sur les conducteurs. Le rotor est soumis à un champ créé par des aimants Alnico (aluminium, nickel, cobalt) très puissants. Ces moteurs donnent une puissance massique comparable à celle d'un moteur à combustion interne. Ils se prêtent à l'utilisation de vitesses de rotation élevées car ils n'ont pas de « réaction d'induit » (modification du champ inducteur dû à la rotation de l'induit). Ces moteurs offrent, de plus, la possibilité de récupérer l'énergie de freinage, possibilité dont l'intérêt apparaît surtout pour le véhicule électrique à générateur autre que le moteur thermique. On ne saurait clore cette question sans citer le moteur Mavilor, de la roue électrique Acec, du moteur Jarret à réluctance variable, et également des recherches très prometteuses faites par le L.C.I.E. sur le moteur homopolaire proche de la roue de Barlow. Ce dernier moteur fonctionne sous une tension très basse (quelques volts) mais supporte un courant d'une intensité de plusieurs milliers d'ampères.

Le moteur triphasé asynchrone, à cage d'écureuil ou à rotor bobiné, présente lui aussi une bonne aptitude au démarrage. Ces types de moteurs ont malheureusement une masse et un encombrement élevés qui gênent leur installation dans les roues. En contrepartie, ils offrent une robustesse à toute épreuve.

Transmission hydraulique : cette question a été traitée dans le chapitre des boîtes de vitesses en ce qui concerne les transmissions hydrocinétiques (V. chap. XVI, § 7.3 et 7.4).

CHAPITRE XVIII

LES ROUES

1. GÉNÉRALITÉS

Une roue est composée d'une jante sur laquelle est fixé le pneumatique et d'un voile ou d'un rayonnage qui réalise la liaison entre le moyeu et la jante. La roue est l'organe intermédiaire entre le véhicule et la route : à ce titre, elle transmet l'effort moteur et l'effort de freinage au sol. Elle supporte le poids du véhicule et les efforts dynamiques dus aux réactions de la route. Enfin, elle reçoit en virage des contraintes latérales importantes. Elle doit, pour répondre à ces divers impératifs, présenter les qualités suivantes, souvent difficilement compatibles :

— solidité ;

— légèreté : la roue est en effet un organe non suspendu et la qualité de la suspension dépend du rapport entre le poids suspendu et le poids non suspendu ;

— rigidité de torsion entre moyeu et jante,

— rigidité axiale contre les contraintes latérales dues aux virages ;

— élasticité radiale pour pouvoir mieux absorber les efforts dynamiques dus aux inégalités de la route ;

— facilité d'échange en cas de crevaison du pneumatique.

Au début de l'automobile, il fallait assurer le démontage du pneumatique et effectuer la réparation sur place car les roues étaient fixes. Depuis la fin de la guerre de 1914-1918, les roues sont amovibles et en cas d'accident on échange la roue défectueuse contre une roue « de secours ». On distingue :

— *les roues fixes* à jantes amovibles, dans lesquelles le voile reste solidaire du moyeu (fig. XVIII-1). La jante est boulonnée sur le voile par des boulons ou taquets ;

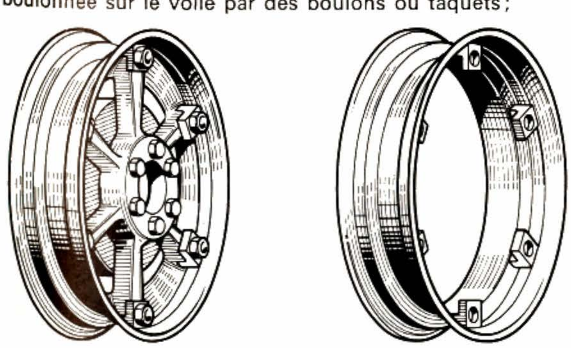


Fig. XVIII-1 — Roue fixe à jante amovible

— *les roues amovibles* à jante fixe ; le voile est alors fixé au moyeu par des écrous ou des dispositifs divers (fig. XVIII-2).

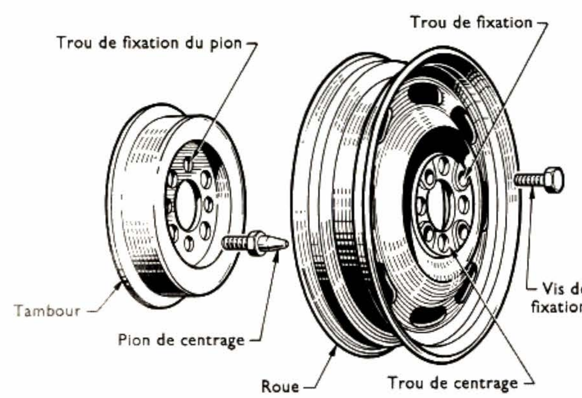


Fig. XVIII-2 — Roue amovible

2. PARAMÈTRES DÉFINISSANT LA ROUE

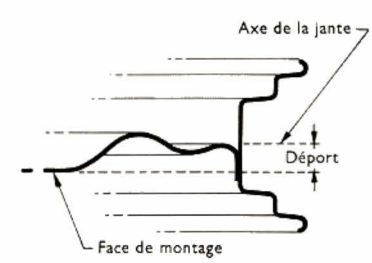
Un véhicule est, dès son origine, étudié avec un type de roue donné qui doit correspondre aux angles caractéristiques des essieux. Une roue est définie par :

— *Les dimensions des « repos » de la jante* sur lesquels viennent reposer les bourrelets du pneumatique après gonflage. Ces dimensions déterminent à la fois la jante et le pneu qu'elle doit recevoir.

— *Le déport*, qui est la distance existant entre le plan de symétrie de la jante et la face d'appui du voile sur le moyeu (fig. XVIII-3). Ce déport détermine la voie du véhicule et intervient dans la géométrie de la direction. Certaines roues, destinées à être jumelées sur les poids lourds ou bien à être utilisées sur des tracteurs agricoles, sont dites « à voie variable » et ont un sens de montage indifférent. Elles ne sont pas employées sur les roues directrices.

Fig. XVIII-3

Déport



— *L'écuanteur*. Certaines roues possèdent un voile tronconique, destiné à augmenter leur élasticité radiale et à compenser l'inclinaison de l'axe de fusée. L'écuanteur est

l'angle formé par une génératrice du cône avec l'axe de la roue.

— *La forme* et *la largeur* de la jante.

— *La monte* du pneu (pneu classique ou sans chambre ou « tubeless »).

— *Les caractéristiques* de la fixation du voile au moyeu :

- nombre et diamètre des trous de fixation,
- diamètre de la circonférence sur laquelle ils sont répartis,
- forme et dimensions des centrages.

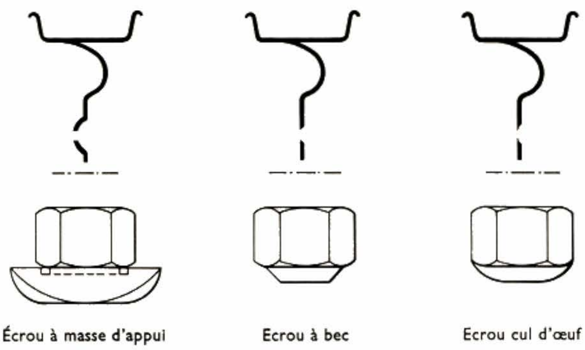


Fig. XVIII-4 — Écrous de fixation ; centrage du voile

Le centrage de la roue par rapport au moyeu est particulièrement important. Il peut être réalisé par des portées coniques ou sphériques des trous du voile, dans lequels viennent s'engager des écrous de fixation (fig. XVIII-4). Dans d'autres cas, le centrage est assuré uniquement par les goujons de fixation ou encore par des pieds de centrage portés par les moyeux et s'engageant dans des trous ménagés dans le voile.

— *La fixation* des enjoliveurs.

Toutes ces caractéristiques sont généralement résumées dans un numéro de code qui définit la roue chez un fabricant déterminé.

3. FABRICATION DES ROUES

Quand il s'agit de roues à jante fixe, le voile est généralement fixé sur la jante par soudure ou rivetage. Pour les jantes destinées à recevoir des pneus « tubeless », le rivetage est seul employé. Un rivet spécial assure l'étanchéité du fond de jante.

Les roues sont généralement en tôle emboutie. Il existe également des roues en alliage léger ou en magnésium qui sont obtenues par coulée, généralement sous pression, dans des moules métalliques. Les poids lourds utilisent, bien que de plus en plus rarement, des roues en acier coulé. Les roues à rayons ont à peu près disparu et ne se rencontrent plus que sur les motocyclettes où les contraintes de virage ne posent guère de problèmes, étant donné l'inclinaison prise par la machine. Sur les véhicules, malgré une répartition des rayons sur trois cônes, ce type de roue résistait mal aux efforts latéraux. Elle était, de plus, d'un prix de revient très supérieur à celui d'une roue emboutie ou moulée.

4. ADAPTATION DE LA JANTE AU MONTAGE DU PNEUMATIQUE

Au début de l'automobile, on a utilisé des pneus à « talons » : le verrouillage du pneu sur la jante était obtenu par des talons qui s'engageaient dans des logements ménagés dans la jante où ils étaient maintenus par le gonflage (fig. XVIII-5). Actuellement, seul le pneu à tringles est utilisé. Ces tringles, en fil d'acier à haute résistance, étant inextensibles et peu déformables, il a fallu prévoir une adaptation de la jante pour autoriser le montage tout en

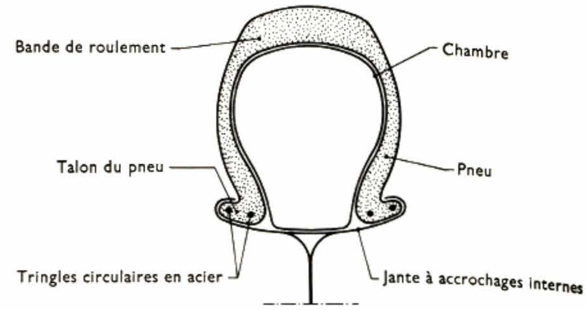


Fig. XVIII-5

Pneu à talons

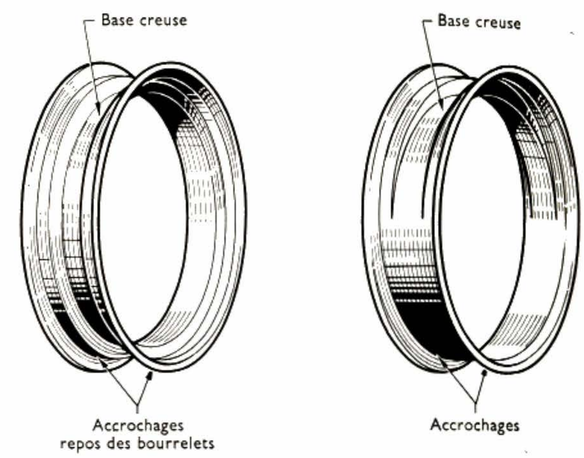


Fig. XVIII-6 — Jantes à base creuse

évitant le déjantage après crevaison. Les principaux dispositifs employés sont :

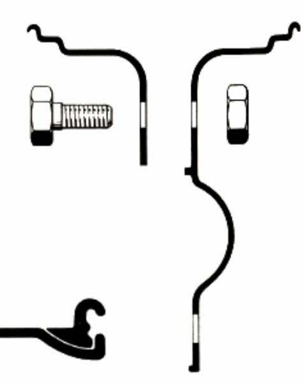
— la jante base creuse, où l'on fait reposer les tringles dans un dégagement central pour permettre de passer les bords de jante (fig. XVIII-6) ;

— la jante base creuse excentrée ; en voie d'abandon, car elle rend l'équilibrage de la roue plus difficile ;

— les jantes plates en deux pièces (fig. XVIII-7) ;

Fig. XVIII-7

Jante en deux pièces



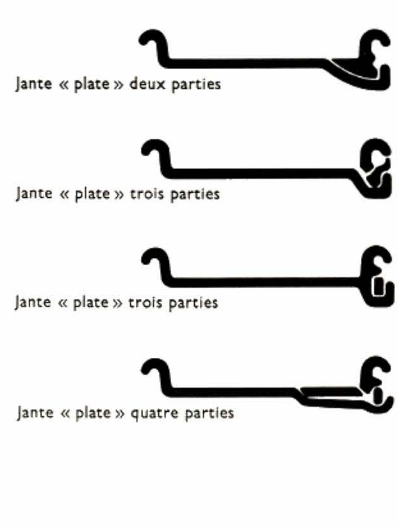


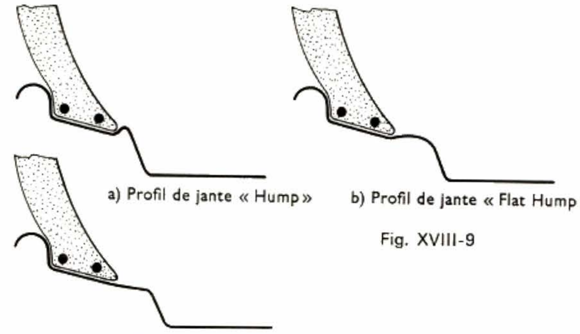
Fig. XVIII-8

Jante plate à joue rapportée (Side ring)

— les jantes plates à joue latérale amovible (fig. XVIII-8), encore appelées *Side ring*.

Le verrouillage du pneu sur la jante, destiné à éviter le déjantage en cas de crevaison et également à empêcher la rotation du pneu sur la jante pendant les accélérations et les freinages, est assuré par la pression exercée latéralement par l'air contenu dans la chambre, pression exercée entre les bourrelets de l'enveloppe et les joues de la jante. Dans certaines réalisations modernes, les « repos » des bourrelets reçoivent des profils inclinés qui favorisent le verrouillage. La figure XVIII-9 montre trois types de profils, dont deux avec bourrelets :

— Hump,
— Flat Hump,
— Flat Ledge.



a) Profil de jante « Hump »

b) Profil de jante « Flat Hump »

c) Profil de jante « Flat Ledge »

Fig. XVIII-9

CHAPITRE XIX

PNEUMATIQUES

1. HISTORIQUE

La première idée de garnir les roues d'un bandage de caoutchouc revient à Robert William Thomson qui, en 1868, a réalisé des bandages pleins. De tels bandages ont équipé nombre de véhicules en Grande-Bretagne, en France et aux États-Unis d'Amérique.

En 1887, le vétérinaire écossais J. B. Dunlop regardait son jeune fils peiner sur son tricycle équipé de bandages Thomson. Il chercha alors à augmenter la largeur des jantes pour réduire l'enfoncement dans le sol mais sans accroître le poids de la machine. Cela le conduisit à utiliser un tube empli d'air. Les premiers essais ont été tellement concluants qu'il a déposé, le 23 juillet 1888, la demande de brevet, nº 70 607, qui constitue l'acte de naissance du pneumatique.

En 1890, Charles Welch breveta pour la première fois l'emploi d'une enveloppe pour tenir la chambre à air. Quelques années plus tard, Dunlop a acquis ce brevet et l'a exploité.

L'enveloppe à carcasse sans trame a été brevetée en 1890 par Fullerton Palmer.

C'est Michelin qui, en France, monta les premiers pneus sur des automobiles ; elles furent équipées aussi bien avec des bandages pleins qu'avec des pneumatiques.

Quant au boyau, il a fait son apparition aux États-Unis d'Amérique en 1893. C'est le principe toujours employé d'une chambre séparable venant se loger dans le corps d'une enveloppe qui est ensuite bandelée ou cousue.

Finalement, le pneumatique actuel est constitué, le plus généralement :

— d'une chambre à air, avec valve de gonflage, formant réservoir d'air ;

— d'une enveloppe constituée par une carcasse recouverte de plusieurs couches de caoutchouc naturel ou artificiel.

2. LES MATIÈRES PREMIÈRES

— La gomme utilisée dans l'industrie du pneumatique peut provenir, soit de plantes sauvages, soit de plantations industrielles, soit de l'industrie qui produit des gommes synthétiques ou, encore, des gommes récupérées et régénérées (V. t. 3, Caoutchoucs).

Le caoutchouc régénéré est obtenu à partir d'enveloppes usagées traitées par des alcalis. Ce procédé permet de récupérer une matière première de qualité inférieure mais dont l'appoint en période de ravitaillement difficile n'est pas négligeable.

— La carcasse est faite avec une toile, soit en coton, soit en rayonne ou, encore, avec des fils métalliques.

Au début, seul le coton était utilisé. Il est constitué de fibres enchevêtrées facilement miscibles à la gomme mais dont la résistance diminue avec l'échauffement. Les câblés de coton utilisés ont un diamètre d'environ 9/10 de millimètre et ont une résistance à la rupture de 8,5 à 9 hectobars. Les câblés sont assemblés en nappes, constituées par neuf à douze câblés par centimètre, reliés par de la gomme. Il n'y a pas de fil de trame.

La mauvaise tenue du coton à la chaleur a amené les manufacturiers à utiliser des fils synthétiques pour leurs nappes. La rayonne retenue se présente sous la forme de petits tubes lisses qui doivent être adhérisés pour retenir la gomme qui leur est apposée. On utilise à cet effet un bain de latex-résorcine-formol. Le fil de rayonne choisi est à haute ténacité, de 1 650 deniers (la masse de 9 000 m de ce fil est de 1,650 kg). La trame des nappes est réduite à quelques fils de coton qui sont détruits au galbage.

Les fils d'acier des carcasses sont en acier Martin au carbone donnant, après traitement, une résistance à la rupture de 200 à 300 hectobars. La section des fils est environ de 0,15 mm^2. En moyenne, la nappe est formée de câblés de sept torons, composés chacun de trois fils torsadés ; ils sont reliés entre eux par la gomme, sans fil de trame, à raison de cinq à neuf câblés par centimètre.

On peut noter qu'aux États-Unis d'Amérique, Goodyear utilise des carcasses en polyester et Firestone en fibres de verre.

— Les tringles sont constituées de fils d'acier cuivré de diamètre voisin du millimètre, enrobés de gomme et enroulés un certain nombre de fois sur une forme circulaire rétractable. On obtient ainsi, sans aucune soudure, un cercle métallique dont les fils sont maintenus en place par de la gomme.

3. FABRICATION DES PNEUMATIQUES

3.1. Enveloppes

3.1.1. Préparation de la gomme. — Si la gomme ne parvient pas à l'usine sous forme de « crêpe » (V. t. 3, Caoutchoucs) on commence par la détremper pour la nettoyer (douze à vingt-quatre heures dans des cuves d'eau chauffées par un courant de vapeur à 80-90 °C) puis elle est déchiquetée en présence d'un courant d'eau, lavée et, enfin, séchée pour éliminer toute trace d'humidité. On obtient ainsi des « crêpes ».

On passe ensuite des crêpes au caoutchouc du pneu par mélangeage, c'est-à-dire en incorporant :

— du soufre pour la vulcanisation, dans la proportion de 2,5 à 3,5 % ;

— une charge fixe de « carbon black » dur, dans la proportion de 40 à 50 % de la masse de gomme ;

— des matières minérales diverses aidant à la vulcanisation (sulfure d'antimoine) ou propres à donner du corps au mélange (blanc de zinc) ; au total 3 à 5 % de la masse de gomme ;

— des factices, dans la proportion de 2 à 3 % de la masse de gomme. Ce sont des matières organiques qui n'ont rien de commun avec le caoutchouc et qui rendent le caoutchouc plus malléable.

Les mélanges sont très variables suivant les manufacturiers et suivant l'usage du produit. Le mélangeage se fait en commençant par broyer et malaxer les feuilles de caoutchouc entre deux cylindres horizontaux à surface lisse, très puissants, et tournant à des vitesses différentes. Il y a une réaction vive à cause de l'élasticité du caoutchouc : la feuille s'étire, se recroqueville et se rompt. Le frottement

échauffe la gomme qui se ramollit et prend l'apparence d'une pâte homogène de consistance plastique. À ce moment, on incorpore progressivement les poudres en coupant la feuille et en la repliant. La feuille continue à être malaxée jusqu'à obtention d'une masse homogène. On a ainsi des « pains mélangés ». Dans cet état le caoutchouc est moins élastique mais il conserve la forme qu'on lui impose. Il gèle encore et se recolle de lui-même par simple pression.

Les pains mélangés sont alors « calandrés », c'est-à-dire mis en forme de feuilles régulières en les faisant passer dans des calandres, sorte de laminoirs à trois ou quatre cylindres à axes parallèles et dans le même plan vertical. Les cylindres chauffés à la vapeur tournent à la même vitesse.

3.1.2. Préparation des toiles. — Elles doivent être enduites de gomme. À cet effet, on prépare une dissolution de la gomme dans de la benzine, du toluène ou de l'éther de pétrole et on la rend parfaitement homogène en la faisant passer dans un mélangeur tournant à grande vitesse.

Les toiles sont enduites au moyen d'une machine dite « machine à *spreading* » comprenant des tambours d'enroulement et de déroulement de la toile et une table chauffante sur laquelle le solvant de la dissolution s'évapore (il est récupéré dans une hotte). Lorsque la table chauffante est verticale on peut enduire les deux faces simultanément.

3.1.3. Montage de l'enveloppe. — Une enveloppe se compose d'une superposition de feuilles de gomme et de nappes de fils ou de toiles enduites, l'ensemble ayant grossièrement la forme d'un tore.

Le montage s'effectue sur un tambour quasi cylindrique et encore parfois, pour les gros pneus de véhicules très lourds, sur noyau galbé.

Après avoir mis une couche de dissolution, l'ouvrier met en place une nappe à l'aide d'un dispositif permettant un approvisionnement continu sous tension constante ; il coupe la nappe à la longueur exacte puis en pose une deuxième. À ce moment, il met en place les tringles munies de bandelettes en poussant à force contre les bords du tambour les disques sur lesquels elles ont été montées. Les pans des deux premières nappes sont rabattus et repliés autour de chaque tringle. Les nappes suivantes sont alors posées. Quand la carcasse est terminée, l'ouvrier met en place les flancs et la bande de roulement, le joint entre les différentes parties étant particulièrement soigné. L'enveloppe ainsi obtenue passe sur une roulette mécanique agissant d'abord au milieu, puis progressivement sur les côtés pour chasser toute bulle d'air. Le tambour est alors enlevé. L'enveloppe est ensuite talquée et passe au conformateur pour que sa forme, jusqu'à présent plate, soit bombée. Le principe de l'opération consiste à diminuer les pressions atmosphériques sur la partie extérieure alors que l'on introduit une chambre à air ou à eau en caoutchouc très épais (*air bag* ou *water bag*) à l'intérieur de l'enveloppe pour la maintenir tendue quand la dépression cesse.

Il ne reste plus qu'à vulcaniser l'enveloppe, ce qui se fait en mettant chaque enveloppe dans un moule à part qui donne la sculpture de la bande de roulement. Le chauffage, à une température comprise entre 110 °C et 150 °C suivant la grosseur, est obtenu par de la vapeur qui circule en permanence dans le moule. Cette opération est d'autant plus longue que l'enveloppe est grosse (45 minutes pour un pneu de 150 × 40 ; 6 heures pour un boudin de 300 mm de largeur). L'enveloppe est finalement soumise à la finition : ébarbage (souvent automatique), équilibrage, éventuellement marquage de la position de la valve.

3.2. Chambre à air (fig. XIX-1). — On part de feuilles de caoutchouc obtenues par calandrage de pains mélangés de composition différente de ceux utilisés pour faire les enveloppes. La chambre à air est faite d'une seule venue ; elle est tout à fait homogène. La fabrication comporte l'étirage dans une boudineuse, la cuisson, la soudure des extrémités et la fixation de la valve.

Le mélange, maintenu plastique par un courant de vapeur circulant entre les doubles parois d'un cylindre, est forcé par une vis d'Archimède dans un espace annulaire existant entre une filière et un mandrin. On obtient ainsi un tube

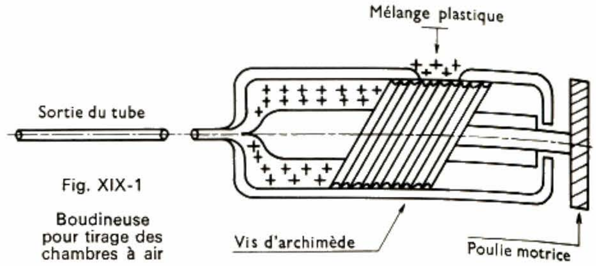


Fig. XIX-1
Boudineuse pour tirage des chambres à air

que l'on coupe à la longueur voulue. Après vulcanisation, on joint et on suture les deux bouts biseautés, puis l'on colle avec une dissolution de gomme dans de la benzine. Chaque anneau de caoutchouc porte un trou fait à l'emporte-pièce par où passe la valve qu'on assujettit.

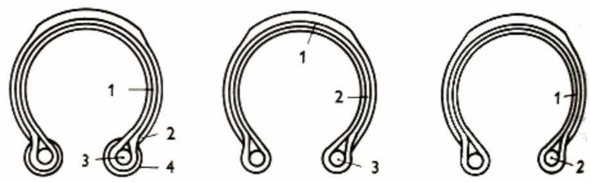
Ainsi fabriquée, la chambre ne prend sa forme définitive de tore qu'une fois montée dans son enveloppe. Pour la feuille de caoutchouc il en résulte des tensions irrégulières, nuisibles, surtout quand la section est importante ; Pour cette raison on a mis au point un procédé donnant à la chambre sa forme délinitive avant vulcanisation. À cet effet, à la sortie de la boudineuse, le tuyau est enfilé sur un tube en forme d'anneau brisé de section extérieure identique à la section intérieure définitive de la chambre. Un procédé plus récent consiste à obtenir cette forme en tore directement, au début de la fabrication en coulant du caoutchouc dans un moule.

4. DESCRIPTION DES PNEUMATIQUES

4.1. Pneumatiques pour bicyclettes. — On distingue le boyau et l'enveloppe à tringles soutenant une chambre à air.

Le boyau est utilisé seul, fixé sur la jante par un vernis gomme-laque ou une dissolution de caoutchouc. Il est confectionné avec des bandelettes coupées en biais de 200 à 300 grammes au mètre carré. La circonférence intérieure comporte une bande de calicot. Une bande, bande de roulement, est collée sur la circonférence extérieure. La valve est mise en place avant vulcanisation.

Le pneu ballon est universellement répandu depuis quarante ans ; c'est un pneumatique à carcasse sans trame. Les tringles sont en fil d'acier cuivré ou bronzé, de 0,6 à 0,7 mm de diamètre, ayant une résistance à la rupture d'environ 160 hectobars. La figure XIX-2 donne des exemples de ce type de pneumatique.



Fixation par simple corde	Modèle à surplis	Modèle à enroulement en diagonale
1. Nappes cordes 2. Corde de fixation 3. Tringle 4. Protection de toile	1. Nappe cordes 2. Surplis 3. Tringle	1. Nappes cordes enroulées par bandes 2. Tringle

Fig. XIX-2 — Exemples de constructions de pneus de bicyclettes

4.2. Les bandages pleins. — Actuellement, ils ne sont plus utilisés que sur des véhicules industriels et des remorques de moyen tonnage, circulant à l'intérieur des entreprises ou sur un chantier, après avoit été conduits sur place par un véhicule routier porteur.

Dans le bandage plein, c'est l'élasticité du caoutchouc qui joue le rôle d'amortisseur ; donc, sous forte charge ou à grande vitesse, l'échauffement est tel que le bandage est détruit.

Les bandages sont constitués d'une jante enduite, revêtue, en général, d'un mélange intermédiaire de gomme et d'une bande de roulement. Une cavité centrale ou des alvéoles multiples sont ménagés à l'intérieur du bandage ; ils lui confèrent une certaine flexibilité. Ces bandages ne peuvent

supporter qu'une charge réduite. Ils ne sont utilisés que pour les jouets d'enfants et pour les véhicules légers de vitesse très limitée.

4.3. Les pneumatiques pour véhicules automobiles. — Un pneu de type courant comprend généralement une enveloppe et une chambre à air, parfois un pare-clous et, dans certains cas, un flap ou un protecteur.

L'enveloppe se compose de la bande de roulement et de la carcasse qui comprend elle-même les nappes protectrices, la gomme de liaison, les nappes de carcasse et les accrochages ou talons (fig. XIX-3).

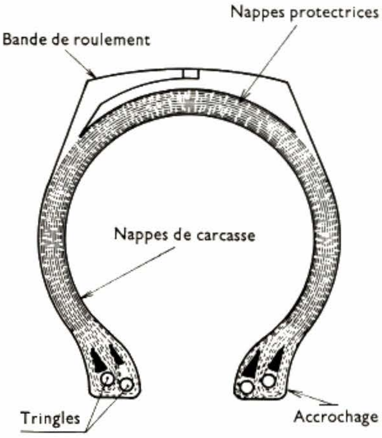


Fig. XIX-3

Enveloppe vue en coupe

4.3.1. Bande de roulement. — La bande de roulement porte une sculpture qui améliore le coefficient d'adhérence. Chaque manufacturier a ses systèmes de sculpture qui sont des compromis entre plusieurs solutions dont chacune est mieux adaptée à un type particulier de terrain : sol dur, pavés, neige. Une sculpture se présente toujours soit sous forme de stries, soit sous forme de petits blocs plus ou moins réguliers. Les rainures entre les blocs et entre les stries servent à éliminer l'eau qui se trouve entre le pneu et la route mouillée. Si cette évacuation n'est pas complète, soit que les rainures sont insuffisantes, soit que la vitesse du véhicule est trop importante pour donner le temps à l'eau d'être éjectée, le contact entre bande de roulement et sol se fait par l'intermédiaire d'un film d'eau qui n'offre pratiquement aucune adhérence ; la direction n'est plus assurée : c'est le phénomène d'*aquaplaning*.

Sur le verglas, le coefficient d'adhérence des pneumatiques est mauvais. On peut l'améliorer, dans la mesure où la réglementation le permet, par des clous en acier au tungstène que l'on introduit dans les saillies de la bande de roulement. Dans la période où des pneus ainsi aménagés ne sont pas autorisés, il faut les déposer et les stocker jusqu'à la mauvaise saison suivante. À ce moment, on doit les monter de telle façon qu'ils tournent dans le même sens que l'année précédente, à défaut de quoi les clous, travaillant tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, sont rapidement ébranlés et risquent d'être projetés par la roue en devenant de véritables projectiles dangereux.

Sur la neige, les clous sont peu efficaces. Un défaut d'adhérence de la bande de roulement se combat par des chaînes enveloppant le pneumatique.

Une bande de roulement s'use par diminution de la hauteur des saillies. Dès qu'elles ont moins de 1 mm, le pneu est usé. Certains essaient de les prolonger en adhérisant, c'est-à-dire en faisant des stries transversales sur la bande de roulement ou en retaillant. C'est une méthode dangereuse car, d'abord on risque d'atteindre les nappes et de les détériorer, ensuite l'épaisseur de gomme étant réduite, les nappes ne sont plus protégées et on risque un éclatement. Un pneu retaillé devrait être réservé aux remorques lentes.

Lorsque la bande de roulement est usée et que les nappes sont bonnes, on peut rechaper l'enveloppe, opération qui consiste à appliquer une bande de roulement neuve.

Deux méthodes principales sont possibles.

- La première consiste à enlever toute la gomme extérieure et à recouvrir l'enveloppe d'une chape de gomme neuve. L'enveloppe est alors cuite dans un moule qui grave les sculptures.
- La deuxième se limite à enlever la gomme usagée, c'est-à-dire sur la seule partie de la bande qui touche le sol, et à la remplacer par un anneau de gomme neuve. On ne recuit que la partie de l'enveloppe ayant reçu de la gomme neuve.

Le second procédé a l'avantage de ne soumettre à une cuisson supplémentaire que la partie usée et à ne conduire qu'à une cicatrice cylindrique alors que celle donnée avec une chape est torique et présente donc des tensions variables en cours d'utilisation. En revanche, le premier procédé donne un aspect plus plaisant que le deuxième. Les résistances à l'usage des enveloppes rechapées par l'un ou l'autre des procédés sont comparables.

4.3.2. Carcasse. — La carcasse est composée de nappes en coton, en rayonne, en fil d'acier ou même en d'autres matériaux comme le fil de verre, noyées dans une gomme plus molle que celle utilisée pour la bande de roulement.

Les nappes peuvent être disposées de deux façons différentes :

1° Les câbles sont placés *en biais* (fig. XIX-4), l'orientation des fils est inversée quand on passe d'une nappe à la suivante. L'angle fait par les fils des deux nappes consécutives est voisin de 40 à 50°. Le nombre de nappes (ou encore de plis) est pair, compris normalement entre deux et vingt, mais il peut atteindre quarante et plus pour les pneus de véhicules très lourds. Les enveloppes de quatre et six plis sont les plus nombreuses. Les carcasses à fil métallique ont, toutes choses égales, beaucoup moins de nappes que celle sen coton ou en rayonne.



Fig. XIX-4

A - Plis croisés
B - Bandelettes talon
C - Tringles
D - Bande de roulement

2° Les câblés sont placés *perpendiculairement au plan longitudinal de symétrie de la roue* (fig. XIX-5). On a ainsi des pneus « radiaux ». Pour empêcher ces pneus d'exagérer ce que nous appellerons « angle de dérive » dans l'étude de la mécanique des pneus, il faut entourer l'enveloppe au moyen d'une ceinture de gomme armée. La ceinture de Michelin, l'inventeur des pneus radiaux, est faite de câblés à peine inclinés, deux nappes consécutives étant inclinées en sens contraire ; elle est pratiquement inextensible. Les États-Unis d'Amérique (qui ont longuement attendu avant de fabriquer des pneus radiaux) ont adopté des ceintures avec câblés fortement inclinés, une couche dans un sens, la suivante dans l'autre. Ces ceintures ne résistent pas à la déformation latérale, ce qui entraîne dérive et mauvaise tenue de route. M. Bourcier de Carbon a observé que les pneus radiaux à ceinture inextensible présentent, de ce fait, l'inconvénient de laisser la voiture prendre de légers mouvements longitudinaux. Il propose



Fig. XIX-5

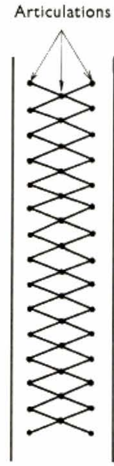


Fig. XIX-6

Ceinture Bourcier de Carbon faite de lamelles métalliques articulées entre elles

des ceintures à éléments fortement inclinés ne pouvant pas prendre de courbure parce qu'articulés entre eux comme dans un tire-bouchon à extension (fig. XIX-6). La réalisation pratique de ce brevet conduit à la suppression des mouvements longitudinaux, tout en ne tolérant que peu de dérive. L'usure du pneu ainsi monté est prévu comme devant se situer entre celle des pneus conventionnels et celle, plus faible, des pneus radiaux.

Remarque importante. — Une voiture doit autant que possible être équipée de pneus identiques, en particulier les deux roues d'un même essieu doivent être montées de la même façon. Dans l'éventualité où un seul essieu reçoit des pneus radiaux, l'autre étant équipé de pneus conventionnels, c'est obligatoirement l'essieu arrière qui doit recevoir les pneus radiaux, sous peine d'accident grave et d'être en contravention avec la réglementation fixée par le Code de la route.

Les accrochages sont les parties de l'enveloppe en contact avec la jante. Ils contiennent les tringles métalliques inextensibles et sont plus épais que les flancs de l'enveloppe.

4.3.3. Chambre à air. — La chambre à air est faite d'une seule venue et est tout à fait homogène. Elle porte la valve de gonflage pour l'introduction de l'air.

La valve (fig. XIX-7) comporte un corps de valve, un écrou de pied de valve assurant la fixation, un clapet avec son ressort et deux joints de caoutchouc, un bouchon avec joint de caoutchouc. Les valves, toutes de même principe, sont de types divers. À titre d'exemple, il est décrit une valve Dunlop. Elle se compose d'un corps *A* à l'intérieur duquel se visse une pièce creuse *B* qui s'appuie sur la paroi interne de *A* par l'intermédiaire d'un cône caoutchouté 7 destiné à assurer l'étanchéité (fig. XIX-8). Une tige *T* traverse la pièce *B* et porte un clapet *D* qui s'appuie sur l'extrémité *C* de la pièce *B*; *D* est maintenu en contact de *C* par un ressort *R*.

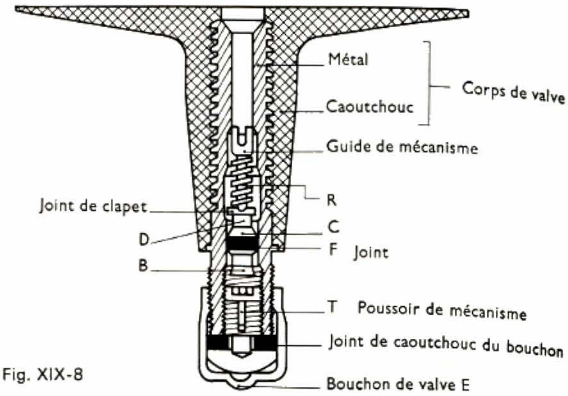


Fig. XIX-8

Le « pare-clous » (fig. XIX-9) est un anneau de caoutchouc qui, par son épaisseur, isole la chambre du sommet de l'enveloppe. On ne le trouve pratiquement qu'avec des pneumatiques de véhicules utilitaires dont la bande de roulement est usée; on prolonge ainsi l'enveloppe en évitant les crevaisons.

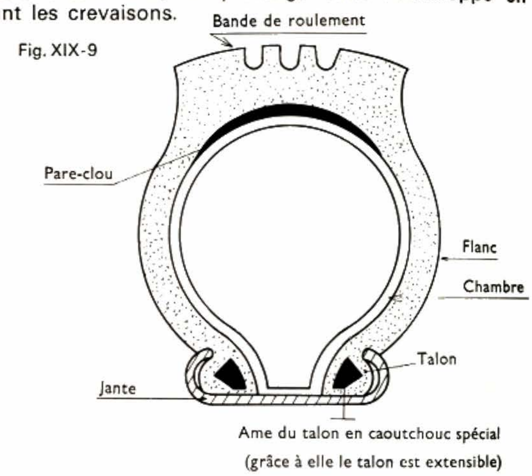


Fig. XIX-9

Le « flap », utilisé uniquement sur les véhicules utilitaires, évite à la chambre d'être placée entre le fond de la jante et les talons de l'enveloppe (fig. XIX-10); il est constitué par de la gomme non armée.

Lorsque les roues sont à rayons, comme, par exemple, les roues de motocyclettes, on place au fond de la jante un anneau de coton pour recouvrir les têtes de rayons. Cet anneau s'appelle un « protecteur » (fig. XIX-11).

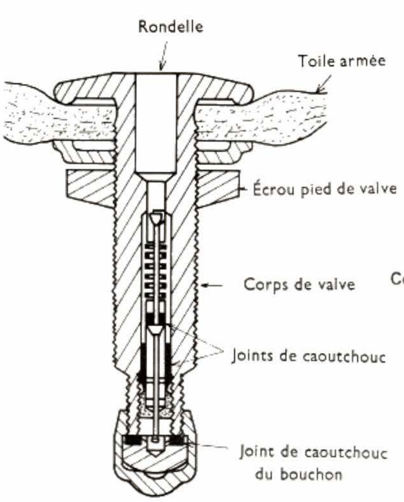
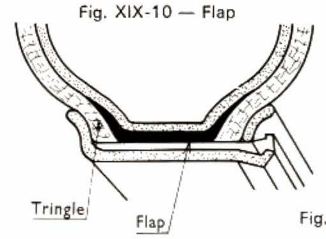


Fig. XIX-7
Coupe d'une valve

Fig. XIX-10 — Flap



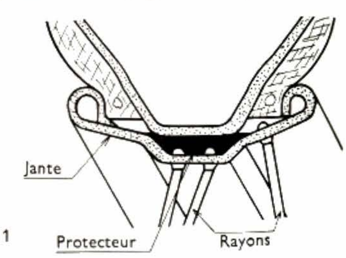


Fig. XIX-11
Protecteur (en noir)

4.4. Pneumatiques spéciaux

4.4.1. Le tubeless. — C'est un pneumatique sans chambre à air. Le réservoir d'air est constitué par l'enveloppe qui reçoit alors un revêtement intérieur de gomme étanche et, par la jante, porteuse de la valve.

4.4.2. Pneu sable. — Le pneu sable est un pneu de type classique dont la bande de roulement ne comporte que de très faibles saillies pour ne pas endommager la

croûte de sable résistante et dont la carcasse est suffisamment rigide pour accepter, sans détériorations, des pressions de gonflage extraordinairement basses (inférieures à 1 bar).

4.4.3. Pneumatiques avec dispositifs anticrevaisons ou increvables. — De nombreux dispositifs ont été mis au point. Nous citerons, à titre d'exemples :

— Les pneumatiques dont la chambre à air est remplacée par un boudin constitué par un tore de caoutchouc percé d'alvéoles transversaux. Ces pneumatiques sont lourds mais supportent de grandes vitesses en assurant une suspension acceptable (fig. XIX-12 et XIX-13).



Fig. XIX-12

Chambre à air Vieil Picard

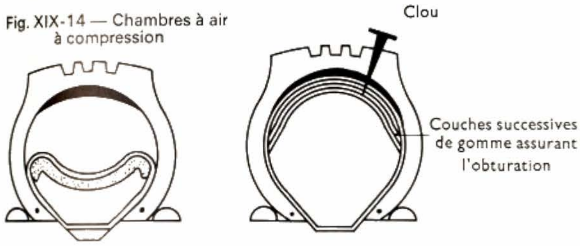


Fig. XIX-13

Chambre à air P.C.A. Dunlop

— Les chambres dites « à compression », constituées par une série de couches de caoutchouc vulcanisé, placées les unes sur les autres. Au cours du roulement, elles jouent les unes sur les autres par glissement et obturent ainsi les perforations éventuelles de la couche périphérique (fig. XIX-14).

Fig. XIX-14 — Chambres à air à compression



— Les chambres à « semi-compression », créées pour remédier à l'échauffement des chambres à compression. Elles sont constituées par un moulage spécial de caoutchouc vulcanisé destiné, lors du gonflage, à créer une faible compression susceptible de serrer un clou en assurant une étanchéité provisoire (fig. XIX-15).

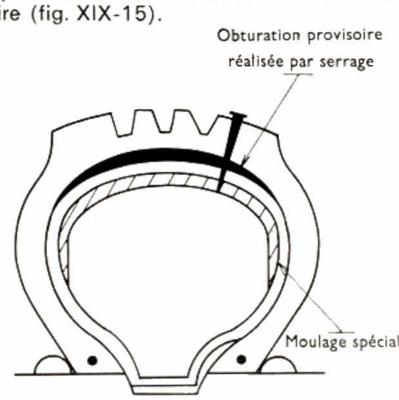


Fig. XIX-15

Chambre à air à semi-compression

On trouve aussi des chambres doubles, des chambres à cloison, des chambres sandwichs avec substance adhésive, etc.

4.5. Désignation d'un pneumatique. — Pratiquement on désigne un pneumatique par la cotation et les caractéristiques d'emplois de l'enveloppe par exemple : pneu 185 × 400 neige.

La cotation de l'enveloppe est donnée en général par deux nombres séparés soit par un *point* soit par un *tiret* soit par le signe *multiplié par*. Les deux nombres sont exprimés tantôt en pouces, tantôt en centimètres, tantôt en millimètres. En général, le premier donne approximativement la grosseur du boudin et le deuxième, avec précision, le diamètre de la jante sur laquelle le pneu doit être monté. Il existe des exemples de cotation où le premier nombre donne le diamètre du pneu et le deuxième la grosseur du boudin ; les pneus Metallic Michelin sont identifiés par une lettre suivie du diamètre de la jante (la grosseur des pneus croît de A à Z).

De ce désordre qui heurte tout esprit cartésien, il faut retenir que la cotation chiffrée doit être considérée comme une pointure plutôt que comme une cote, sauf en ce qui concerne le diamètre de la jante qui doit être respecté sous peine de risque de déjantage.

5. MÉCANIQUE DU PNEUMATIQUE

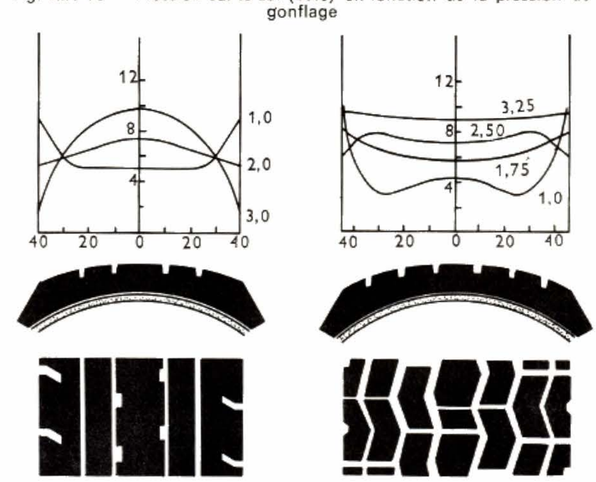
5.1. Généralités. — Le pneumatique, d'une part, est solidaire de la roue par l'action de la pression de gonflage sur les accrochages s'appuyant sur la jante et, d'autre part, repose sur le sol. Il supporte le poids du véhicule et les différents efforts provenant de la roue ou agissant sur elle (couple moteur, couple de freinage, poussée due à l'inertie, inertie centrifuge, inclinaison du sol, effet transversal du vent). Le pneumatique est donc déformé par écrasement et par torsion, ce qui entraîne des frottements internes, des variations de tension des fils des nappes et des altérations de l'angle fait par les angles des fils de deux nappes consécutives. Pratiquement, ce travail interne se traduit par une consommation d'énergie et par un échauffement qui peut élever la température de l'enveloppe à près de 100 °C et même notablement plus si les conditions de charge, de gonflage et de vitesse fixées par le constructeur ne sont pas respectées.

Les expressions « rayon sans charge », « rayon sous charge statique » se comprennent d'elles-mêmes. La valeur de l'écrasement, différence des rayons sans charge et sous charge, donne la flèche dont le maximum est compris entre le cinquième et le quart de la grosseur du boudin. Quand le véhicule se déplace, il y a des transferts de poids d'un essieu sur l'autre en raison des accélérations, de la déclivité du sol, de la résistance de l'air et du vent. Par suite, le « rayon dynamique sous charge », appelé « rayon de roulement », n'est pas constant et sa moyenne est différente du rayon sous charge statique.

5.2. Répartition de pression sur le sol. — L'aire de contact du pneu sur le sol est sensiblement elliptique. La pression que le pneu applique dépend de la pression de gonflage, augmentée du fait des tensions provenant de la carcasse déformée car elles ne sont pas les mêmes en tous points de la zone d'impact. Dans ces conditions il est facile de concevoir que la pression du pneu sur le sol n'est pas uniforme.

Les figures suivantes représentent des diagrammes expérimentaux obtenus au Laboratoire de recherches de Stuttgart.

Fig. XIX-16 — Pression sur le sol (bars) en fonction de la pression de gonflage



La figure XIX-16 donne, pour une coupe des deux enveloppes figurées, la pression sur le sol en fonction de la pression de gonflage ; la figure XIX-17 reproduit un diagramme de pression obtenu par une roue en marche.

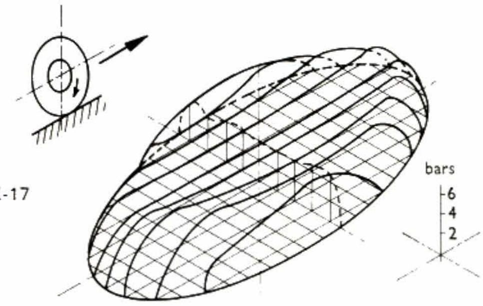


Fig. XIX-17

L'examen de ces deux figures permet de vérifier que :

— Dans le sens transversal, de la périphérie de l'aire de contact et jusqu'au centre, la pression sur le sol commence par croître rapidement, passe par un maximum vers l'aplomb des flancs de l'enveloppe puis décroît jusqu'à un minimum, d'autant moins accusé que la pression de gonflage est plus grande.

— Dans le sens longitudinal, l'allure générale est la même que dans le sens transversal mais, par suite des effets dynamiques, le maximum de pression du côté de l'avant est plus accentué que celui de l'arrière.

Pour une pression convenable de gonflage, l'allure du diagramme est telle que l'on peut admettre que la pression sur le sol est constante sur toute l'aire de contact mais nettement plus grande que la pression de gonflage. Si la pression de gonflage est sensiblement plus forte ou plus faible que cette pression convenable, la partie médiane travaille seule ou, au contraire, ne travaille pratiquement pas. Le pneu s'use mal et vite (la pression de gonflage fixée dans les notices d'entretien du véhicule est la pression à froid, qui, après échauffement normal au roulage, donne une pression quasiment uniforme sur l'aire de contact).

5.3. Déformation sous l'influence d'un couple ou d'un effort longitudinal (fig. XIX-18). — Si l'on applique un couple au moyeu d'une roue immobile, la jante tourne dans le sens du couple. Le pneumatique restant immobile il subit une déformation qui ne peut être que longitudinale puisqu'il n'y a aucune force transversale. L'aire de contact restant immobile, les différents rayons primitifs sont inclinés différemment suivant la position qu'ils occupent. Les rayons primitifs de la partie droite sont inclinés de telle sorte que le caoutchouc est comprimé. Ceux de la partie gauche ont l'inclinaison contraire et le caoutchouc est dilaté. La position de *OB* n'est évidemment pas modifiée. L'étude mathématique de la variation de l'inclinaison conduit aux conclusions résumées ci-après.

Les rayons primitifs correspondant à l'aire de contact sur laquelle règne une pression quasiment uniforme, sont inclinés du même angle. Ceux correspondant à la partie de l'aire sur laquelle la pression est décroissante ont une inclinaison qui varie selon une loi complexe difficile à préciser. De plus, ceux qui correspondent à la partie de pneu qui ne touche pas le sol ont une inclinaison qui varie selon une loi exponentielle. Dans tous les cas, l'effort de compression ou de dilatation supporté par un élément de caoutchouc est proportionnel à l'inclinaison du rayon primitif correspondant.

Supposons que la roue se mette en mouvement. Dans la zone où l'inclinaison des rayons primitifs est constante, il ne se passe rien si le coefficient d'adhérence pneu sur sol est suffisant. Dans la partie libre du bandage, il y a un déplacement par rotation de la périphérie dans le sens contraire de la marche. Ce phénomène, appelé « avance élastique », auquel s'oppose la réaction élastique du bandage exige une consommation d'énergie, cause de diminution de rendement.

Dans la zone de variations complexes, deux cas sont à distinguer : l'avant et l'arrière.

— À l'avant, les rayons primitifs qui viennent en contact sont moins inclinés que ceux qu'ils remplacent et dans cette modification n'interviennent que des efforts élastiques ; il n'y a donc pas de glissement de pneu sur le sol.

— À l'arrière, l'inclinaison va en diminuant et le caoutchouc est maintenu déformé par l'adhérence sur le sol. Si la pression diminue, la force d'adhérence diminue jusqu'à permettre le glissement. Il existe donc à l'arrière une zone de glissement qui croît avec le couple moteur.

En conclusion, seule l'entrée de l'aire de contact a une bonne adhérence et, par suite, le problème de l'adhérence d'un pneu roulant sur le sol n'est pas aussi simple qu'il peut paraître au premier abord.

Si au lieu d'un couple on applique à la fusée de la roue un effort longitudinal, les déformations sont de même nature que celles procurées par un couple. Dans le cas de la figure XIX-18, c'est un effort de la droite vers la gauche qui donnerait les déformations du couple agissant dans le sens des aiguilles d'une montre.

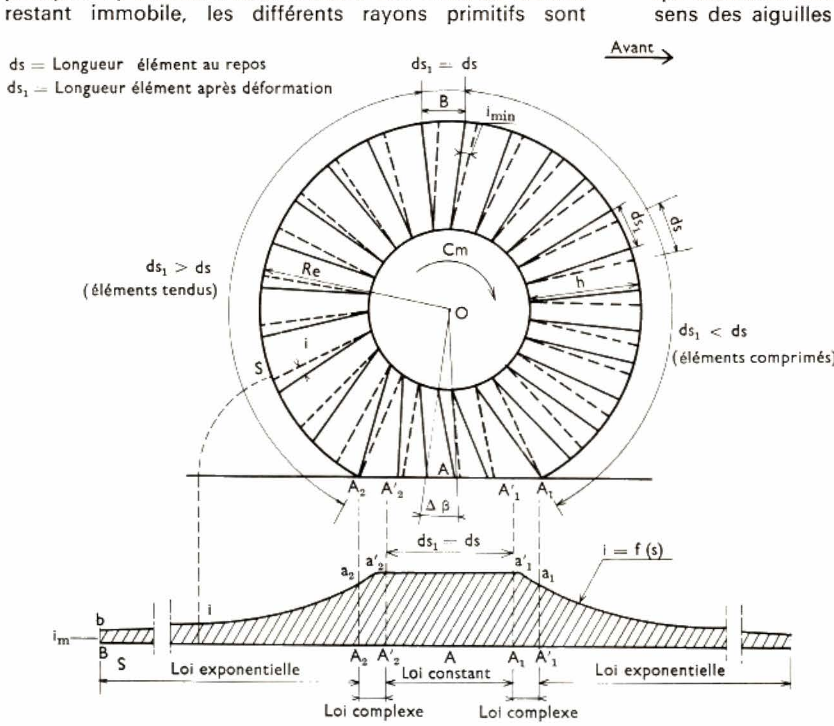


Fig. XIX-18

Déformation sous l'influence d'un couple ou d'un effort longitudinal

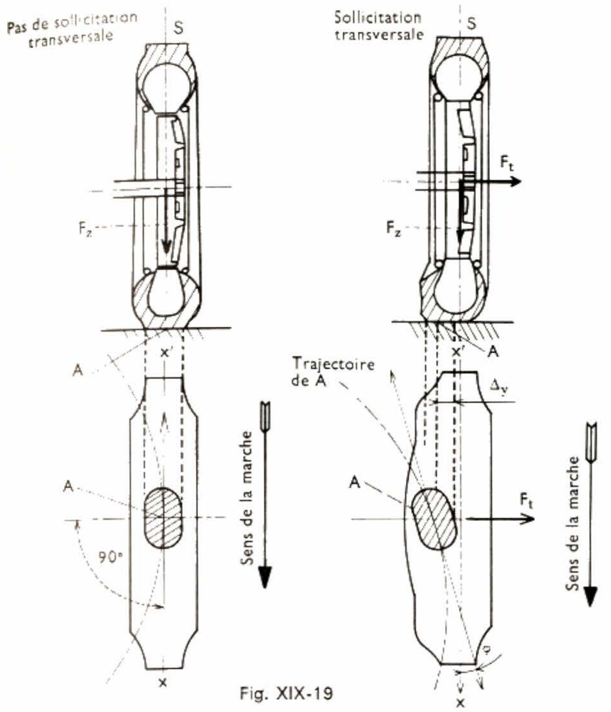


Fig. XIX-19

5.4. Déformation sous l'influence d'un effort transversal (fig. XIX-19). — Lorsqu'une roue munie d'un pneumatique roule sur le sol sans être l'objet d'une sollicitation transversale, la trajectoire décrite par le centre *A* de l'aire de contact est constamment tangente en *A* à la trace *xAx'* du plan de la roue sur le sol. Mais si cette roue est soumise à un effort transversal F_t, le pneumatique se déforme et le point *A* quitte la trace *S* du plan de symétrie du pneu et la tangente à la trajectoire de *A* n'est plus parallèle à *x'x*. La roue cède lentement à la poussée sans qu'il y ait pour cela glissement général de l'aire de contact. Ce phénomène s'appelle la « dérive du pneu » et l'angle φ que fait la tangente en *A* à la trajectoire avec *x'x* est l'« angle de dérive ». En même temps que se manifeste la dérive, prend naissance, par réaction du pneu, un couple à axe vertical qui tend à orienter la roue dans le même sens que la dérive.

Si l'angle de dérive des roues arrière est plus fort que l'angle de dérive des roues avant, la voiture est survireuse ; si c'est le contraire, elle est sous-vireuse (une voiture est survireuse ou sous-vireuse selon que la courbe trajectoire a un rayon de courbure plus petit ou plus grand que le voudrait l'angle de braquage des roues).

5.5. Fibres stationnaires — Déroulement inégal. — Sur la coupe primitive d'un pneu avant déformation peuvent être mis en évidence deux points symétriques *A* et *B* par chacun desquels passe une fibre qui, après déformation de l'enveloppe, s'applique sur le sol sans allongement ni contraction. Il est aisé de concevoir que les fibres longitudinales de l'enveloppe, passant entre *A* et *B*, sont contractées dans la partie qui touche le sol et que celles qui sont à l'extérieur de *A* et *B* sont dilatées dans la partie qui touche le sol. Les fibres *A* et *B* sont dites *stationnaires*. Elles séparent l'aire d'impact sur le sol en trois zones : une au centre dite zone des fibres contractées, une de chaque côté appelées zones des fibres dilatées. Sous l'action d'une accélération positive ou négative, il y a transfert de poids d'un essieu sur l'autre donc variation de l'écrasement des pneus. Les fibres stationnaires se rapprochent ou s'éloignent en réduisant ou en augmentant la zone comprimée. À chaque instant, le rayon des fibres stationnaires est égal au rayon de roulement dont la valeur moyenne est comprise entre le rayon sans charge et le rayon sous charge.

Supposons maintenant que le pneu ne soit ni compressible ni dilatable, on ne peut expliquer le roulement des pneumatiques sans dire que les fibres comprimées ont une vitesse plus grande que les fibres stationnaires et que les fibres dilatées ont, au contraire, une vitesse plus faible, d'où le nom de « déroulement inégal » donné à cette théorie.

En réalité, le caoutchouc n'est ni parfaitement dilatable, ni parfaitement rigide. Il se produit donc à la fois des déformations et des glissements dans la partie en contact avec le sol. Les coupes de la figure XIX-20 montrent les zones de déformation et celles de glissement dont l'étude systématique a prouvé que ces différentes zones réagissent les unes sur les autres en entraînant des glissements transversaux. L'Institut de Stuttgart a pu établir par mesures expérimentales le graphique objet de la figure XIX-21, qui donne la direction des différents glissements.

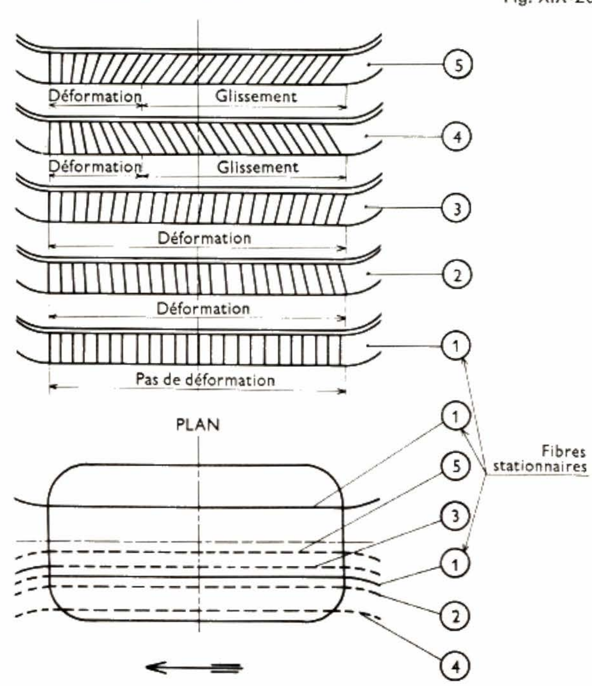


Fig. XIX-20

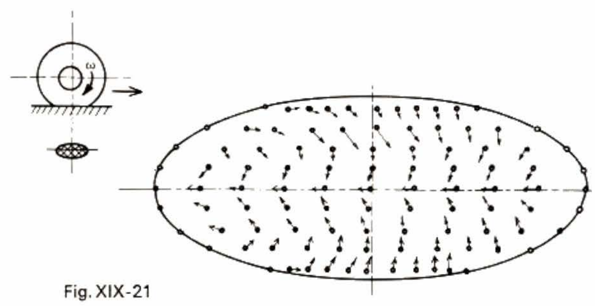


Fig. XIX-21

Il va sans dire que s'il y a dissymétrie dans les deux zones de fibres dilatées donc dans le déroulement inégal, prend naissance un couple de braquage dont le sens est tel que la roue tend à se diriger du côté où elle est sollicitée transversalement.

5.6. Quelques conclusions de la mécanique des pneumatiques. — Les explications données sur la mécanique des pneumatiques montrent combien est complexe l'étude théorique de la résistance d'un pneu. En effet, quand tous les efforts se font sentir simultanément, la situation est très complexe. Le calcul des contraintes qui se fait en étudiant le passage d'une position à une autre doit considérer une translation, une flexion et une déformation, sans oublier qu'il s'agit d'un matériau composite dont chaque élément n'est pas forcément homogène.

Quoi qu'il en soit, les notions de mécanique exposées permettent d'expliquer certains comportements, comme l'usure des bandes de roulement et la comparaison des pneus conventionnels et des pneus radiaux.

5.6.1. Usure des bandes de roulement. — Lorsqu'une roue est uniquement porteuse, l'effort de propulsion est faible donc les fibres stationnaires sont rapprochées : les zones extérieures glissent en avançant sur le sol et, par suite, s'usent; les blocs glissant vers l'avant s'usent davantage sur la face attaquant le sol, face qui est épaulée par de la matière, que sur l'arête de fuite qui peut s'effacer dans le vide. Donc la roue uniquement porteuse s'use en double cône, les flancs étant râpés les premiers et les blocs de la bande prenant une forme détalonnée.

Sur les roues motrices, les fibres stationnaires s'écartent : c'est la partie médiane qui s'use en roulant et, par suite, les blocs sont détalonnés dans le sens contraire de ceux des roues uniquement porteuses.

Ces faits d'expérience prouvent que l'usure de la bande de roulement est imputable principalement au glissement du roulement inégal. Il est donc très important d'avoir des pneus suffisamment gonflés, à défaut de quoi le déroulement inégal accroît son influence.

Il faut noter que la surface usée de l'enveloppe porte souvent, surtout sur les flancs, des stries inclinées mettant en évidence l'existence des glissements transversaux, ce qui ne doit pas surprendre en pensant au diagramme représenté par la figure XIX-21.

De plus, il ne faut pas oublier que la dérive est augmentée par un couple appliqué à la roue mais son sens n'est pas le même quand le couple est moteur ou résistant. Dans le premier cas, la roue cède à la sollicitation et dans le second, elle lutte contre elle.

5.6.2. Pneus conventionnels et pneus radiaux. — Plus l'angle des nappes est grand, plus faible est la résistance à la dérive mais plus la souplesse (donc le confort) assurée est grande. C'est ce qui justifie la solution de compromis des pneus conventionnels. Michelin a eu l'idée d'augmenter le confort au maximum en utilisant le plus grand angle possible pour les nappes, soit 180° et en donnant une rigidité suffisante pour lutter contre la dérive au moyen d'une ceinture inextensible, alliant ainsi confort et tenue de route satisfaisante. Mais, la ceinture étant inextensible, il n'y a aucun glissement sur l'aire de contact, ce qui se traduit par un roulement dur et une propension à des petits mouvements longitudinaux compensant la rigidité de la ceinture qui n'accepte pas le déroulement inégal. D'un autre côté, l'absence de glissement supprime un gaspillage d'énergie, donc réduit l'usure de la bande et la consommation de carburant. Nous avons déjà vu que la solution américaine d'utiliser des ceintures extensibles est catastrophique pour la tenue de route ; aussi, pouvons-nous penser que la solution de M. Bourcier de Carbon, qui consiste à adopter des ceintures extensibles mais ne permettant pas la moindre flexion, ne peut donner que d'excellents résultats. En contrepartie l'usure et la consommation de carburant sont un peu plus grandes qu'avec des pneus radiaux actuels, mais elles restent inférieures à celles obtenues avec des pneus conventionnels.

6. CHENILLES SOUPLES

Il paraît difficile de clore ce chapitre sur les pneumatiques sans signaler les chenilles souples, qui sont à base de caoutchouc et constituent un organe de roulement pour des véhicules relativement légers (ne dépassant pas quelques tonnes).

Un premier type de chenilles souples est constitué par une bande sans fin, plate, en caoutchouc entoilé, sur laquelle sont boulonnés les accessoires suivants (fig. XIX-22) :

a) À l'intérieur, deux rangées de dents d'entraînement et une rangée centrale de talons de guidage. La distance qui sépare deux dents d'entraînement de la même rangée s'appelle le « pas de la chenille » (fig. XIX-23).

Ce sont des blocs de caoutchouc fixés sur la face intérieure de la chenille. Les premiers engrènent dans des logements prévus sur le barbotin dont ils reçoivent l'effort

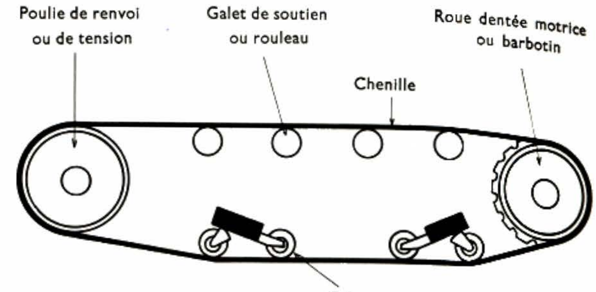


Fig. XIX-22

moteur. Les seconds trouvent place dans les gorges du barbotin et de la poulie de tension ; ils s'opposent à un glissement latéral de la chenille.

b) À l'extérieur des patins métalliques comportent des blocs de roulement. Les patins sont fixés sur la face extérieure ; ils renforcent la chenille. Les blocs de roulement sont constitués soit par du caoutchouc entoilé et boulonné sur le patin (Hutchinson), soit par du caoutchouc collé sur le patin, préalablement cuivré (Paulstra).

Les galets roulent sur la bande de caoutchouc dans l'espace situé entre les dents d'engrènement et les talons de guidage.

Primitivement, ces chenilles étaient fabriquées une à une comme les pneumatiques puis, pour augmenter la cadence de production, Hutchinson a fabriqué des lés de grande longueur, débités avant cuisson en bandes de longueur convenable, la fermeture étant obtenue par greffe.

Il est évident que la bande de caoutchouc d'une telle chenille travaille à la traction sous l'effet du barbotin et à l'écrasement sous l'action des galets porteurs. On a eu l'idée de soulager les bandes en les remplaçant par trois bandes étroites, en caoutchouc entoilé, sur lesquelles sont fixés, par des boulons et écrous, des patins métalliques, de telle sorte que les galets roulent directement sur les patins au lieu de rouler sur les bandes, devenues uniquement tractrices. Cependant, à l'usage, il est apparu qu'il

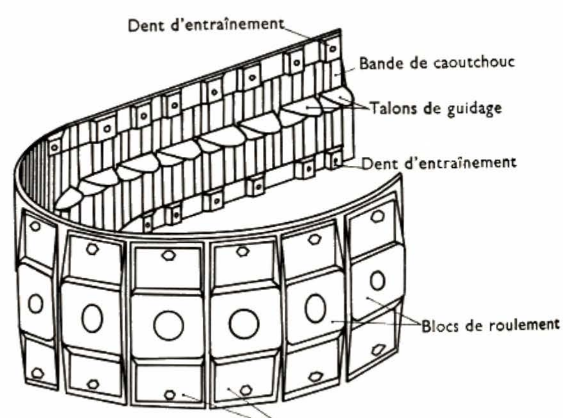


Fig. XIX-23 — Chenille souple monobande

est impossible, surtout dans un virage, de répartir équitablement l'effort entre les trois bandes. Il en résulte une rupture d'une bande extérieure, suivie de celle des deux autres. La durée de vie d'une telle chenille arrive péniblement à la moitié de celle d'une chenille monobande de même masse.

Un deuxième type de chenilles, fabriqué aux États-Unis d'Amérique, est constitué par deux bandes de caoutchouc, armées de câbles d'acier et réunies à intervalles réguliers et rapprochés par des entretoises d'acier noyées à leur extrémité dans la masse de caoutchouc et dont la partie centrale est organisée pour permettre l'entraînement et le guidage. On se rend compte que, dans une telle chenille, les câbles d'acier travaillent seuls à la traction tandis que la gomme des bandes ne subit que des efforts de compression puisque l'allongement des câbles est extrêmement faible.

L'ÉQUIPEMENT

CHAPITRE XX

LES FREINS

Les Codes de la route de tous les pays réglementent le freinage. Le Code français prescrit les règles suivantes: « Tout véhicule automobile ou ensemble de véhicules doit être pourvu de deux dispositifs de freinage dont les commandes sont entièrement indépendantes. L'installation du freinage doit être à action rapide et suffisamment puissante pour arrêter et maintenir à l'arrêt le véhicule ou l'ensemble de véhicules. Sa mise en œuvre ne doit pas affecter la direction du véhicule circulant en ligne droite.

« L'un au moins des dispositifs de freinage doit agir sur des surfaces freinées fixées aux roues rigidement ou par l'intermédiaire de pièces donnant une sécurité suffisante.

« Seules sont dispensées de l'obligation des freins les remorques uniques sous la double condition que leur masse totale autorisée en charge ne dépasse pas 750 kg ni la moitié de la masse à vide du véhicule tracteur ».

Ces prescriptions sont explicitées par un arrêté en date du 18 août 1955 (J.O. du 28 août 1955).

1. DYNAMIQUE DU FREINAGE

Supposons qu'un conducteur freine pour ralentir ou s'arrêter devant un obstacle. Il commence par relâcher la pédale de l'accélérateur, ce qui annule l'effort moteur et applique aux roues un effort résistant dit « frein-moteur » qui vient s'ajouter aux efforts résistants dus à la résistance de l'air et à la résistance au roulement; mais tous ces efforts étant en général très faibles, pour obtenir un ralentissement notable, il faut utiliser le frein de service. Le résultat de ces efforts, et principalement celui du frein de service, conduit à un ralentissement qu'on appelle *décélération* (ce qui signifie accélération de sens opposé à la vitesse; on l'exprime cependant par un nombre positif).

L'expérience montre que cette décélération, théoriquement variable, est sensiblement constante pendant un coup de frein, c'est-à-dire que le mouvement peut être considéré comme uniformément retardé.

Appelons:

- γ: la décélération moyenne (en mètres par seconde au carré),
- t_1: un instant quelconque après le début du freinage qui est pris pour origine des temps (en secondes),
- V_1: la vitesse du véhicule à l'instant t_1 (en mètres par seconde),
- e_1: l'espace parcouru pendant une durée t_1,
- L: la distance d'arrêt (en mètres),
- t: le temps de freinage (en secondes),
- V_0: la vitesse au moment du début du freinage (en mètres par seconde).

Les équations générales du *mouvement uniformément retardé* en palier sont les suivantes:

$$V_1 = V_0 - \gamma t_1$$

$$e_1 = V_0 t_1 - \gamma \frac{t^2_1}{2}$$

Les conditions correspondant à l'arrêt sont les suivantes:

$$t_1 = t \;,\quad V_1 = 0 \;,\quad e_1 = L$$

D'où il vient:

$$V_0 = \gamma t, \text{ soit: } t = \frac{V_0}{\gamma}$$

et:

$$L = \frac{V_0^2}{\gamma} - \frac{V_0^2}{2\gamma} = \frac{V_0^2}{2\gamma} = \frac{V_0 t}{2}$$

L'espace parcouru L pendant le temps t du freinage a donc pour valeur: $L = \frac{V_0^2}{2\gamma} = \frac{1}{2} V_0 t$. Si t et L sont connus, il est possible de déduire la valeur de la décélération moyenne au cours du freinage:

$$\gamma = \frac{V_0}{t} = \frac{V_0^2}{2L}$$

Bien entendu, ce raisonnement suppose le véhicule sur route plate; si le véhicule est en rampe (ou en pente) la décélération est accrue (ou réduite), pour un même effort de ralentissement sur la pédale de frein. Cela est dû à l'action de la pesanteur qui est fonction de la pente de la trajectoire.

En pratique, l'exécution du freinage du véhicule automobile comporte trois phases successives. À partir du moment où le conducteur aperçoit l'obstacle jusqu'à celui où l'arrêt est terminé nous pouvons distinguer:

— Une phase purement psychologique pendant laquelle le conducteur, ayant aperçu l'obstacle, réagit et transporte son pied de la pédale d'accélérateur à la pédale de frein. La durée de cette phase dépend des réflexes du conducteur. C'est le *temps de réflexe*.

— Une phase qui s'étend depuis le moment où le conducteur commence son action sur la commande des freins jusqu'au moment où ceux-ci exercent leur effort retardateur. La durée de cette phase, ou *temps mort*, dépend du genre de commande et de la complexité de la transmission de l'effort depuis la pédale jusqu'aux roues.

— Une phase pendant laquelle s'exerce effectivement l'action des freins. C'est le *temps de freinage effectif*.

Si nous appelons t_0 le temps *correspondant au total du temps de réflexe et du temps mort*, le véhicule parcourt une distance $L_0 = V_0 t_0$ avant le commencement effectif du freinage, et la *distance pratique d'arrêt* devient:

$$L = V_0 t_0 + \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{\gamma}$$

À la suite d'essais exécutés dans les laboratoires de psychotechnique, il apparaît que le temps de réflexe, qui est d'ailleurs influencé par le degré d'attention, est au minimum de 0,5 s et qu'il dépasse la seconde pour un grand nombre

d'individus. Quant au temps mort dû aux systèmes modernes de commande (hydraulique, pneumatique, électrique), il est très faible : compris entre quelques centièmes de seconde et 0,2 s.

La dynamique du freinage ne se borne pas à l'étude de la distance d'arrêt, qu'on appelle souvent *l'efficacité* des freins, et pour être complète, elle nécessite de façon concomitante l'étude de trois problèmes :

La *stabilité* du freinage, c'est-à-dire l'aptitude du véhicule à rester sur sa trajectoire, en ligne droite durant le freinage.

La *progressivité* du freinage, c'est-à-dire la possibilité, (qui est une nécessité) pour le conducteur de pouvoir régler l'efficacité de son freinage.

Le *contrôle* du freinage, c'est-à-dire la possibilité pour le conducteur de maintenir facilement le véhicule en freinage dans la direction initiale et dans la voie où se trouve le véhicule, en agissant sur le volant de direction et éventuellement sur la pédale de frein.

Les facteurs affectant la stabilité du freinage sont nombreux, complexes et souvent traîtres pour le conducteur non prévenu ; ils se rattachent notamment :

— aux *blocages de roues* en freinage, dangereux à l'avant comme à l'arrière, particulièrement à grande vitesse et sur sol peu adhérent (outre qu'ils diminuent l'efficacité de freinage en augmentant la distance d'arrêt) ;

— aux problèmes de *l'inégalité d'action des freins*, sans qu'il y ait blocage, à grande vitesse ;

— aux problèmes de *dépendance* entre le freinage, la direction et la suspension ;

— au *freinage en virage* (direction braquée), qu'il faut éviter, en conséquence, dans la mesure du possible.

Des progrès ont été accomplis dans le domaine de la stabilité, depuis une quinzaine d'années, en remplaçant, notamment dans les voitures rapides, les freins à tambour antérieurs par des freins à disque.

Des appareils récents, appelés anti-enrayeurs, parce qu'ils évitent notamment le blocage (enrayage) des roues et ses conséquences, permettront sans doute un nouveau progrès important dans ce domaine.

2. PRINCIPE DU FREINAGE

Un véhicule en mouvement possède une certaine *énergie cinétique* proportionnelle à sa masse et au carré de sa vitesse. Le freinage a pour but, en diminuant ou en annulant la vitesse du véhicule, d'absorber cette énergie cinétique. Pratiquement celle-ci est transformée en énergie calorifique par frottement entre un organe lié au châssis (organe fixe) et un autre organe lié aux roues (organe en mouvement). D'autres systèmes de freins peuvent être imaginés ; par exemple, accroissement de la surface frontale du véhicule (*frein aérodynamique*) ou accroissement des résistances internes (*frein à récupération* des véhicules électriques, *frein à courants de Foucault, frein-moteur*). Nous verrons ultérieurement que certains d'entre eux sont utilisés mais la totalité des véhicules automobiles actuellement en circulation utilisent les freins dits *à friction* comme système de freinage principal.

Ce type de frein est essentiellement constitué par des éléments de friction (segments, mâchoires) solidement ancrés sur une partie fixée liée au châssis du véhicule, et qui viennent s'appliquer en frottant sur un élément (tambour, disque) lié directement à la roue ou porté par l'arbre de commande de la roue. Cet élément est donc en rotation. Le frottement transforme l'énergie cinétique du véhicule en chaleur. Au fur et à mesure de la transformation de l'énergie, le véhicule ralentit jusqu'à l'arrêt complet si le conducteur le désire.

L'énergie que le système de freinage doit absorber et dissiper est considérable dans certains cas. Les exemples chiffrés suivants en donnent une idée.

Exemple 1 : Voiture pesant, en ordre de marche, avec passagers et bagages, 1 400 kg. Le coup de frein est donné à un moment où la vitesse V du véhicule est de 120 km/h, ou 33,3 m/s. Les freins et les pneumatiques sont en très bon état et la décélération moyenne est de 6 m/s².

L'énergie cinétique du véhicule, de masse M égale à 1 400 kg a pour valeur :

$$W = \frac{1}{2} M V^2 = \frac{1}{2} 1\,400\ (33{,}3)^2 = 776\,223 \text{ J}$$

La décélération moyenne étant de 6 m/s², le temps de freinage en secondes est :

$$t = \frac{V_0}{6} = \frac{33{,}3}{6} = 5{,}5 \text{ s}$$

L'énergie cinétique, soit 776 223 J, doit donc être dissipée en 5,5 s, ce qui correspond à une *puissance de freinage :*

$$P = \frac{776\,223}{5{,}5} = 141\,131 \text{ W (soit environ 190 ch)}$$

maintenue pendant plus de 5 s.

La chaleur Q à dissiper est donc égale à :

$$Q = \frac{776\,223}{4\,180} = 186 \text{ kcal (1 kcal} = 4\,180 \text{ J)}$$

Exemple 2 : Tracteur et semi-remorque pesant en charge 35 t. La vitesse en palier au moment du coup de frein est de 60 km/h ou 16,66 m/s. La décélération moyenne donnée par le dispositif est de 5 m/s².

Nous avons les valeurs suivantes :

Énergie cinétique :

$$W = \frac{1}{2} 35\,000 \,.\, \frac{(60\,000)^2}{(3\,600)^2} = 4\,806\,900 \text{ J}$$

Temps de freinage :

$$t = \frac{16{,}66}{5} = 3{,}33 \text{ s}$$

Puissance équivalente au freinage :

$$P = \frac{4\,806\,900}{3{,}33} = 1\,443\,513 \text{ W}$$

(soit environ 1 960 ch)

Chaleur à dissiper :

$$Q = \frac{4\,806\,900}{4\,180} = 1\,150 \text{ kcal}$$

Il faut encore savoir que même lorsque la vitesse du véhicule est faible, il n'est jamais possible d'arrêter « sur place » ; il y a toujours une certaine distance et un certain temps de freinage. En outre, il ne faut pas croire que le blocage des roues correspond à un freinage parfait. L'effort de freinage est maximal lorsque les roues sont près d'être bloquées, mais tournent encore. Le blocage d'une roue, outre les risques d'instabilité signalés, a pour effet de réduire dans des proportions importantes, proches de 30 %, l'adhérence disponible entre le pneu et le sol.

Distance et temps d'arrêt. — La distance et le temps d'arrêt dépendent non seulement des qualités du conducteur (*temps de réflexe*) et de la puissance des freins mais encore du coefficient de frottement des roues sur le sol (nature et état du sol), de l'état des pneumatiques (nature et usure des sculptures), de l'action de la pesanteur (freinage en palier, en côte ou en descente), du bon état des freins (usure des garnitures, réglage du jeu, état des tambours, etc.) et de la répartition de leur puissance entre les deux essieux.

Il n'est donc pas possible de fixer d'une façon précise le temps et la distance d'arrêt minimaux correspondant à une vitesse déterminée. Mais, malheureusement, trop souvent, les conducteurs surestiment leur propre valeur et celle de leurs freins.

L'arrêté du ministre des Travaux publics et des transports en date du 18 août 1955 (J.O. du 28 août 1955) a fixé les distances d'arrêt minimales. Au-dessus de ces distances le véhicule sera réputé dangereux et devra être immédiatement remis en état. En cas d'accident, le conducteur risquera de voir sa culpabilité gravement engagée.

Distances d'arrêt minimales pratiquées en palier. La distance d'arrêt est donnée par la formule :

$$L = V_0 t_0 + \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{\gamma}$$

c'est-à-dire qu'elle augmente beaucoup avec la vitesse du véhicule pour une décélération γ donnée (c'est-à-dire, en pratique, pour une pression déterminée sur la pédale de frein) et, pour une vitesse donnée, elle diminue quand on accroît la décélération γ en appuyant plus fort sur la pédale de frein.

On ne peut toutefois agir sur celle-ci que de façon limitée, sinon on bloque les roues avec les inconvénients correspondants (instabilité du véhicule — distance d'arrêt accrue car la décélération γ, roues bloquées, diminue du fait de la diminution du coefficient de frottement pneu-sol au moment où la roue se bloque).

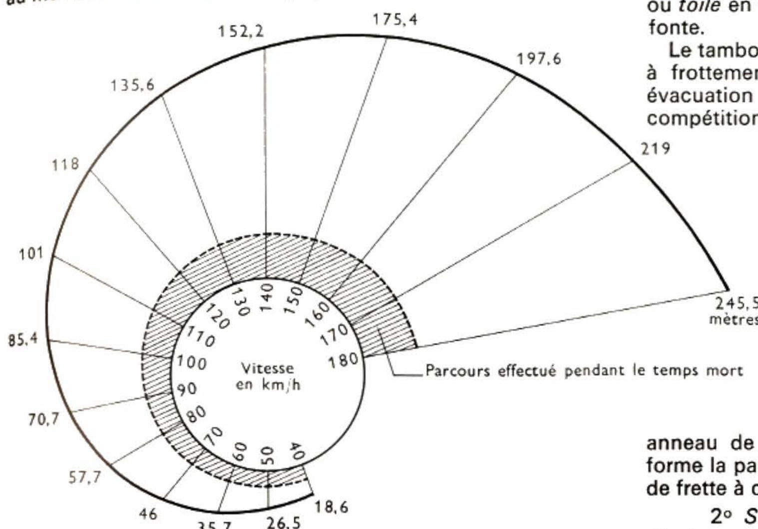


Fig. XX-1

Distance d'arrêt d'un véhicule

L'abaque (fig. XX-1) établi en partant de bonnes valeurs moyennes : sol sec, temps de réaction égal à 0,75 s, décélération de 6 m/s² (cette décélération de 6 m/s² est possible de façon très générale avec les automobiles modernes sur sol sec et en ligne droite, sans blocage de roues) montre les distances d'arrêt *minimales* selon la vitesse ; elles augmentent très vite avec celle-ci.

De plus, il faut savoir que ces distances augmentent considérablement quand le sol est mouillé, par exemple de 50 %, parce qu'alors il n'est pas possible d'atteindre des décélérations γ pratiques de 6 m/s², particulièrement à grande vitesse.

Des distances d'arrêt inférieures à celles de l'abaque peuvent sans doute être obtenues mais dans des *conditions exceptionnelles* (conducteur expérimenté et très attentif, freins extrêmement bien réglés, état de charge de la voiture bien adapté, etc.), *sur lesquelles on ne peut pas compter normalement en pratique.*

3. RÉALISATION DU FREINAGE

Le freinage du véhicule automobile est réalisé au moyen d'un ensemble de dispositifs qui appartiennent à deux groupes dont les fonctions sont bien distinctes. Ce sont :

— Les freins proprement dits.

— Le système de commande qui permet au conducteur de mettre les freins en action.

Les freins utilisés actuellement sur les véhicules automobiles sont les *freins à tambour* et les *freins à disques*, ces derniers se généralisant au détriment des premiers depuis quelques années.

3.1. Freins à tambour. — Une capacité cylindrique appelée *tambour* est fixée à la roue et tourne avec elle. Contre la face cylindrique intérieure de ce tambour viennent s'appliquer deux *segments* ou *mâchoires* qui épousent la forme du tambour. Pour cela elles s'éloignent de leur position de repos, en s'écartant, d'où le nom de *frein à expansion*. Cet écartement est obtenu soit à l'aide d'une *came* portée par un axe commandé par un levier (cas des freins de poids lourds), soit par deux *pistons* se déplaçant en sens opposé dans un cylindre recevant un liquide sous pression (cas des freins des voitures particulières).

Lorsque le freinage est terminé, les deux segments sont rappelés à la position initiale de repos par des *ressorts*.

3.1.1. Organes de freins

1° *Tambour*. — Il comporte un *voile* et une *jante*. Le voile sert à la fixation sur la roue. Il assure la transmission du *couple de freinage*. La jante, en forme de cylindre, possède sur sa surface extérieure des *ailettes de refroidissement* tandis que sa surface intérieure ou surface de frottement est soigneusement usinée au tour. Le plus souvent, voile et jante sont d'une seule pièce en fonte ; toutefois, il existe des tambours (construction américaine) constitués d'un voile ou *toile* en tôle emboutie, solidement fixé dans la jante en fonte.

Le tambour est généralement en fonte perlitique ou fonte à frottement. Dans certains cas où l'on recherche une évacuation rapide de la chaleur dégagée (voiture de compétition, voiture de sport), le tambour est bimétal. Un anneau de fonte est intimement lié à l'alliage léger qui forme la partie extérieure de la jante (procédé *Alfin*) et sert de frette à cet anneau.

2° *Segments*. — Ils sont en alliage léger, en tôle d'acier ou en fonte (poids lourds). Ils doivent être exécutés et montés de façon à épouser aussi parfaitement que possible la courbure du tambour lorsqu'ils sont appliqués (sinon la pression serait inégalement répartie).

Leur surface est recouverte d'un matériau spécial de frottement ou *garniture*. Dans une certaine mesure, la plasticité de cette garniture permet de rattraper les différences de concentricité entre segments et tambour. La garniture est généralement composée de trois constituants fondamentaux :

— l'*amiante* (type chrysotile bien épierré) ;

— des *vernis* et *résines* servant de *liant*. Ce liant comprend des résines synthétiques type formophénolique, des huiles siccatives, du caoutchouc, des produits bitumineux ;

— des *charges*, d'ailleurs très nombreuses. Ce sont, par exemple :

- le zinc, le cuivre, le laiton, en fils ou en poudre, pour accroître la résistance et les qualités d'évacuation thermique ;
- le graphite, dont les propriétés lubrifiantes régularisent le frottement ;
- la poix, le charbon, la noix de cajou qui permettent d'agir sur la valeur du coefficient de frottement ;
- la silice, l'oxyde de fer, le talc qui apportent leurs qualités d'autopolissage.

Les garnitures sont exécutées sous deux formes :

— *Produits tissés*, à partir d'un tissu d'amiante armé de fils métalliques, trempé dans un imprégnant qui est ensuite cuit. La pièce de tissu peut être commercialisée en plaques, en bandes enroulées, ou en garnitures prêtes au montage.

— *Produits moulés* constitués par des fibres d'amiante courtes mélangées au liant et aux charges, le tout moulé sous forte pression et traité à la température voulue. Les produits moulés sont plus rigides que les produits tissés. Ils sont commercialisés cintrés aux cotes et prêts au montage.

La fixation des garnitures aux mâchoires se fait par *rivetage* ou *collage :*

— *Rivetage*. — Les rivets les plus utilisés sont en laiton, parfois en cuivre. Les rivets en aluminium ou en acier sont à prohiber car en cas d'usure des garnitures ils peuvent éroder et rayer le tambour. Les rivets sont à tête plate et à tige forée d'un diamètre de 3,5 à 4,5 mm ; il en faut douze à vingt-quatre suivant la grandeur du segment.

— *Collage.* — La garniture est fixée sur la mâchoire à l'aide d'un adhésif synthétique. La suppression des rivets augmente l'épaisseur utile de frottement et le risque d'érosion est supprimé. De plus, la transmission de chaleur de la garniture au segment se fait mieux.

Après rivetage ou collage, les extrémités de la garniture sont *détalonnées*. Cette opération consiste à abattre chaque extrémité de façon à obtenir une épaisseur progressive depuis la moitié de cette épaisseur à l'extrémité jusqu'à l'épaisseur totale à 15 ou 20 mm environ de l'extrémité (un peu avant le premier rivet). On évite ainsi que le frein *engage* brutalement.

3.1.2. Montage des segments. — L'écartement des segments est obtenu soit par l'action d'une came (commande mécanique du frein à main), soit par l'action des extrémités de deux pistons poussés par un liquide comprimé dans un cylindre. À sa partie inférieure, chaque segment pivote autour d'un point fixe. Un ressort ramène les deux segments à la position de repos dès que le conducteur cesse d'agir sur le frein à main ou sur la pédale de freinage. Ce montage très simple est appelé *frein à deux mâchoires pivotantes* (fig. XX-2).

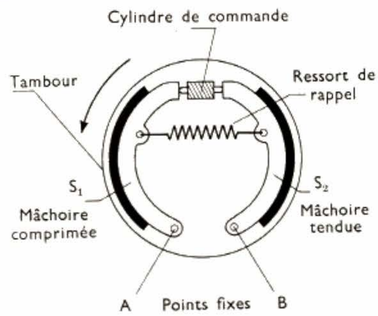


Fig. XX-2

Frein à deux mâchoires pivotantes

La mâchoire S_1 dont le point fixe est en aval du segment dans le sens de rotation est la *mâchoire comprimée*, tandis que la mâchoire S_2 dont le point fixe est en amont est la *mâchoire tendue*. Par suite de l'effet d'enroulement, l'effort de freinage de la mâchoire comprimée ou *mâchoire engageante* est plus grand que celui de la mâchoire tendue ou *mâchoire traînante*. Lorsque l'on freine en marche arrière, la mâchoire S_2 devient mâchoire engageante et S_1 est mâchoire traînante. Comme l'on freine beaucoup plus souvent en marche avant qu'en marche arrière il en résulte que la mâchoire S_1 s'use plus rapidement que la mâchoire S_2.

On remédie à cet inconvénient par divers moyens tels que l'utilisation de garnitures de qualités différentes, ou de surfaces différentes pour S_1 et S_2 ou encore en agissant sur S_2 à l'aide d'un piston de plus grande surface qui accroît l'*effort*. Quand il y a usure des garnitures, le *jeu au repos*, c'est-à-dire la distance entre tambour et mâchoire, est augmenté et l'attaque du frein est moins rapide.

Pour compenser l'usure on procède au *réglage du frein* au moyen de divers dispositifs. Dans le cas d'attaque par came on tourne la came dans le sens du freinage par rapport au levier de commande. Dans le cas d'attaque par commande hydraulique des excentriques réglables permettent de limiter la course de retour, ce qui rétablit le jeu normal. Fréquemment aussi les pivots des talons de segments qui constituent les points fixes sont constitués par un axe garni d'une bague excentrée. En agissant sur la position de ces bagues on peut écarter ou rapprocher les points fixes ce qui permet de mieux centrer les segments, etc.

3.1.3. Frein à mâchoires flottantes. — Le pivotement sur point fixe qui impose une répartition déterminée de pression a, en outre, des inconvénients d'emploi. Il peut être avantageusement remplacé par le *frein à mâchoires flottantes* (fig. XX-3) dans lequel les points fixes sont remplacés par une *butée* fixe sur laquelle les talons des mâchoires s'appuient librement. De ce fait les segments S_1 et S_2 ont deux degrés de liberté. En plus du ressort de rappel au repos, il y a un deuxième ressort qui les applique sur la butée. Ce frein permet un centrage automatique.

3.1.4. Frein à double commande. — Lorsqu'un véhicule est lourd ou qu'il peut rouler vite, c'est-à-dire

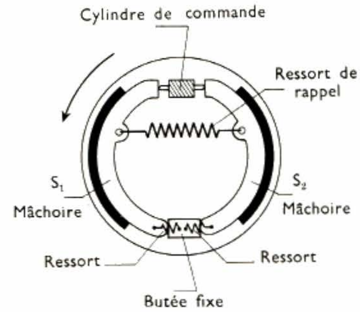


Fig. XX-3

Frein à mâchoires flottantes

lorsqu'une grande puissance de freinage est nécessaire, on monte deux cylindres de commande, chacun actionnant une mâchoire et servant de butée à l'autre (fig. XX-4).

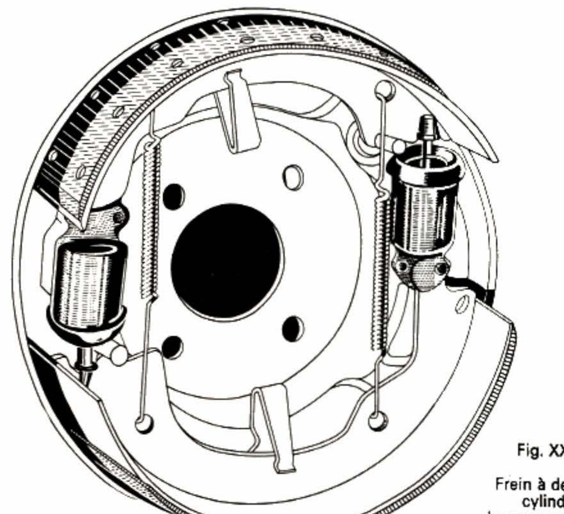


Fig. XX-4

Frein à deux cylindres de commande

On les appelle freins à deux comprimées. Ils sont particulièrement puissants, mais on peut obtenir des puissances de freinage plus grandes avec des freins autoserreurs ou duo-servo très utilisés aux États-Unis d'Amérique.

3.1.5. Frein autoserreur. — Dans le but d'assurer un effort de freinage plus uniforme sur la surface des garnitures et d'augmenter cet effort, Henri Perrot a mis au point le *frein autoserreur* (fig. XX-5). Dans ce frein les points fixes

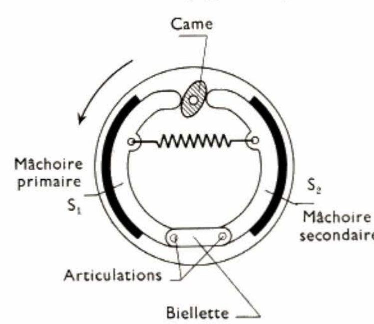


Fig. XX-5

Frein autoserreur

et la butée des freins précédents sont supprimés mais les deux talons sont réunis par une biellette sur laquelle ils sont articulés. Lorsque le piston ou la came agissent sur S_1, celle-ci, qui fonctionne en mâchoire comprimée, vient au contact du tambour qui tend à l'entraîner. Grâce à l'articulation de la biellette elle se centre sur le tambour et elle pousse la biellette qui transmet la poussée à S_2. Cette mâchoire S_2, arc-boutée sur son piston ou sur la came et poussée par S_1, devient à son tour une mâchoire comprimée comme S_1. L'effet d'enroulement se manifeste de la même façon sur S_1 et sur S_2, et l'effort de freinage est accru. La mâchoire S_1 est appelée *mâchoire primaire* et S_2 est la *mâchoire secondaire*.

Du fait de la réaction de la mâchoire secondaire sur la came qui sert de butée, la manœuvre de la came devient dure, et en même temps l'action de cette même came sur la mâchoire primaire entraînée par le tambour devient plus faible. Pour supprimer cet inconvénient, la came n'attaque que la mâchoire primaire et la mâchoire secondaire est ancrée sur un point fixe autour duquel elle pivote et qui sert de butée. Mais cet artifice donne à la mâchoire secondaire les inconvénients d'une mâchoire pivotante et de plus le frein n'est autoserreur que dans un seul sens puisqu'en marche arrière la mâchoire secondaire, qui n'est pas commandée directement, ne peut pas jouer le rôle de mâchoire primaire.

3.1.6. Frein duo-servo Bendix. — Pour remédier à cet inconvénient Bendix a imaginé le système dit à *came flottante*.

À la partie supérieure, le frein comporte un point fixe solidaire du plateau de frein. La came est posée sur ce plateau, mais non fixée et une large ouverture lui permet de tourner et de se déplacer légèrement à droite et à gauche de ce point fixe sans le toucher. Les deux mâchoires sont reliées au point fixe par deux ressorts de tensions inégales, le plus dur étant accroché à la mâchoire secondaire.

Les talons des deux mâchoires sont posés sur les extrémités de vis à pas inverses dont le corps d'écrou est constitué par le *régleur*. Deux ressorts appliquent constamment les mâchoires contre le régleur qui joue le rôle de biellette flottante transmettant la poussée d'une mâchoire à l'autre. Le régleur sert aussi, comme son nom l'indique, à régler le frein et à rattraper les jeux d'usure.

Le fonctionnement est le suivant : quand le conducteur freine, la came agit sur les mâchoires en les écartant et, comme le ressort de liaison de la mâchoire primaire au point fixe est le plus faible, cette mâchoire entre d'abord en contact avec le tambour qui l'entraîne. Par l'intermédiaire du régleur, faisant office de biellette, elle pousse la mâchoire secondaire qui, entraînée à son tour, vient s'appuyer contre le point fixe qui fait office de butée et non pas de pivot. On a en quelque sorte réuni tous les perfectionnements déjà exposés.

Nous venons de faire le raisonnement en utilisant une came de commande, mais il est *a fortiori* applicable avec une commande par cylindre hydraulique et pistons qui constituent, par conception même, une véritable came flottante.

Dans certains freins basés sur le principe ci-dessus on a réalisé un rattrapage automatique du jeu (fig. XX-6).

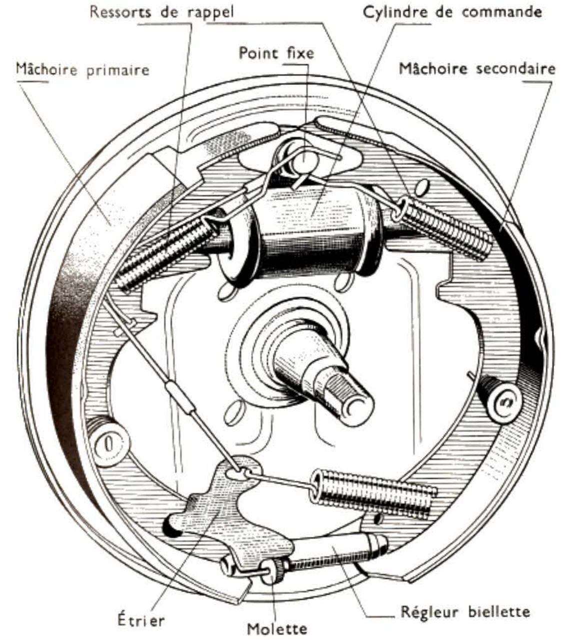


Fig. XX-6 — Au fur et à mesure de l'usure des garnitures, le déplacement de l'étrier sur la gauche s'accentue et provoque la rotation de la molette du régleur qui écarte les talons des mâchoires et rattrape le jeu (*Rambler*)

3.2. Frein à disque. — L'idée même du frein à disque n'est pas nouvelle puisque le premier brevet correspondant, brevet Lanchester, remonte à 1902 et diverses applications en ont été faites, notamment comme freins de transmissions sur camions, avant la seconde guerre mondiale, comme freins de chars pendant cette guerre, et en 1949 comme essai de frein de voiture particulière par Chrysler sous forme d'un frein à disque fermé, type embrayage, et à autoserrage.

Mais il a fallu attendre les progrès découlant de l'utilisation du frein à disque en aviation, et l'amélioration des matériaux de frottement correspondants, pour qu'en 1952 apparaisse (lancé d'abord par Dunlop sur des voitures de course), le frein à disque moderne dit *spot*, appelé encore frein à disque « à pinces » ou « pincé ». Le freinage est assuré par serrage contre un disque de deux patins occupant un faible angle au centre (quelques dizaines de degrés, d'où le nom de spot par opposition aux freins à disque antérieurs où les patins formaient une couronne épousant la forme du disque) permettant donc un refroidissement direct du disque par l'air sur la majeure partie de sa circonférence.

Les patins, et les pistons commandant leur serrage sont contenus dans une structure en forme de U ou de O, enjambant ou entourant le disque, appelée « étrier ». Quand la pression est appliquée dans les cylindres, les pistons se déplacent et la structure agit donc comme une pince qui vient appliquer les patins frottants contre le disque. Les figures XX-7 et XX-8 illustrent le principe de ces freins.

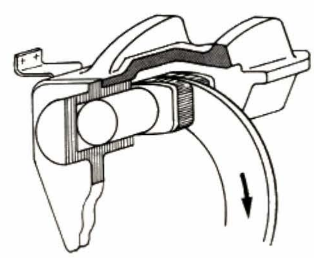


Fig. XX-7

Principe du frein à disque pincé

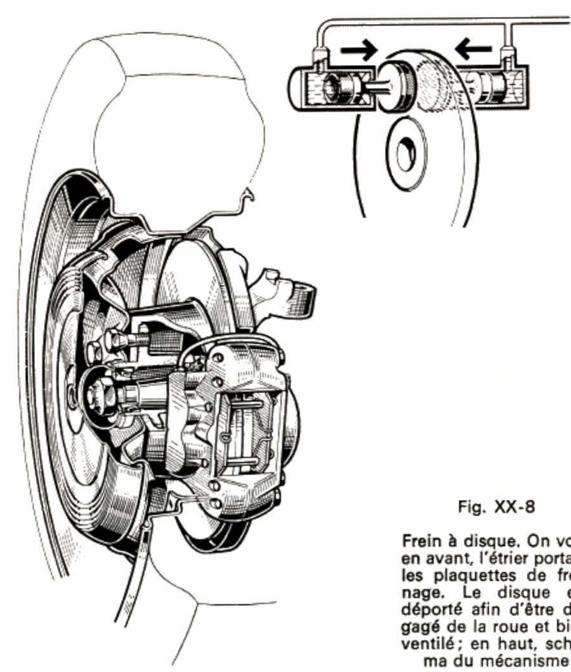


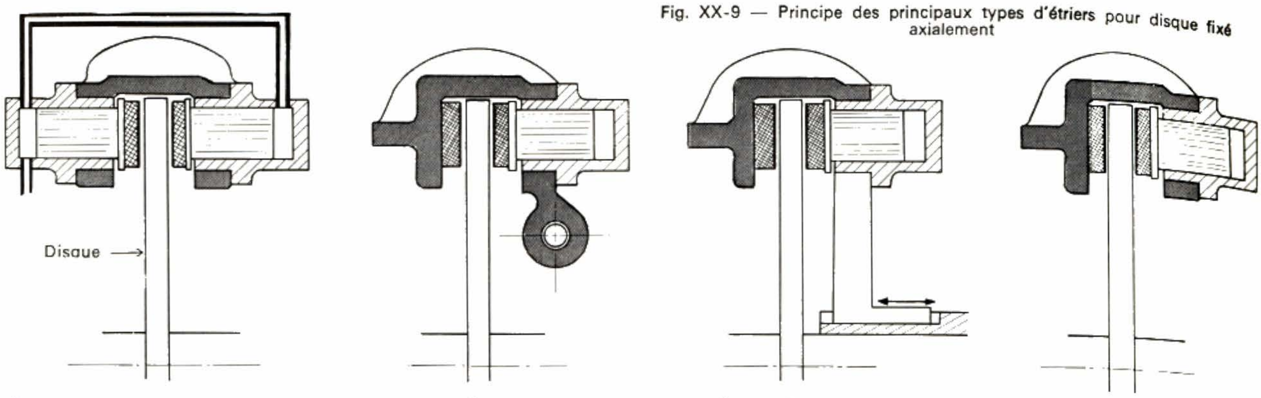
Fig. XX-8

Frein à disque. On voit, en avant, l'étrier portant les plaquettes de freinage. Le disque est déporté afin d'être dégagé de la roue et bien ventilé ; en haut, schéma du mécanisme

Selon la façon dont l'étrier est conçu on distingue notamment (V. fig. XX-9) :

— Le *frein à étrier fixe*, avec de chaque côté du disque un piston mobile.

— Le *frein à étrier articulé*, avec un piston mobile d'un seul côté ; quand la garniture poussée par le piston mobile vient au contact du disque, l'axe d'articulation permet à



Étrier fixe — Étrier coulissant — Étrier articulé — Étrier flottant

Fig. XX-9 — Principe des principaux types d'étriers pour disque fixé axialement

l'autre face de l'étrier de venir, par réaction, au contact du disque ; ce montage économise un piston.

— Le *frein à étrier coulissant*, équivalent au cas précédent quand l'axe d'articulation est à l'infini.

— Le *frein à étrier flottant*, de principe identique aux deux cas précédents mais où l'étrier flottant ne supporte plus le couple de freinage.

Par ailleurs, le disque peut être soit mince et compact, ce qui est le cas très général des disques équipant les voitures européennes de grande série, soit du type « ventilé » comme il est courant aux États-Unis d'Amérique et pour certains véhicules européens thermiquement chargés. Ce disque ventilé se présente alors comme constitué de deux plateaux parallèles reliés entre eux par des entretoises qui sont réalisées de façon à ménager entre elles des intervalles faisant office de canaux radiaux où circule l'air quand le disque tourne (fig. XX-10).

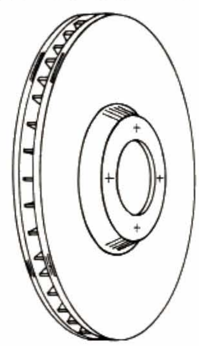


Fig. XX-10

Disque ventilé

3.2.1. Propriétés du frein à disque type « spot ». — Le frein à disque type « spot » a un certain nombre de propriétés d'où résultent des avantages et des inconvénients vis-à-vis des freins conventionnels à tambour :

— Forme plate (simplicité, indéformabilité, non-dilatation en épaisseur, mais rayon moyen diminué par rapport au tambour équivalent).

— Deux faces de freinage (d'où une surface de freinage et de refroidissement accrue).

— Frein ouvert (avantage thermique pour le refroidissement, facilité de remplacement des garnitures) ; cette disposition a posé cependant des problèmes pour éviter l'entrée d'eau.

— Surface de garniture réduite (bon portage mais durée de vie réduite par usure).

— Frein non autoserreur mais neutre, d'où une meilleure fidélité du frein et une meilleure stabilité générale, avantages particulièrement importants pour la stabilité en freinage des voitures rapides. En contrepartie, la voiture doit être équipée d'un servofrein (à moins d'accepter d'exercer des efforts importants sur la pédale) dès que la masse du véhicule dépasse une limite, variable selon les cas, mais voisine d'une tonne en général. Pour les voitures rapides dépassant sensiblement une tonne le servofrein est, en quelque sorte, le prix à payer pour les avantages du frein à disque comparativement aux freins à tambour.

3.2.2. Frein mixte. — Le fait que le frein à disque courant ne soit pas autoserreur a posé des problèmes pour les freins à main. Ils ont été résolus de diverses manières. L'une d'elles, élégante, consiste à monter des freins mixtes à tambour et à disque, le frein à main agissant mécaniquement sur le frein à tambour (fig. XX-11).

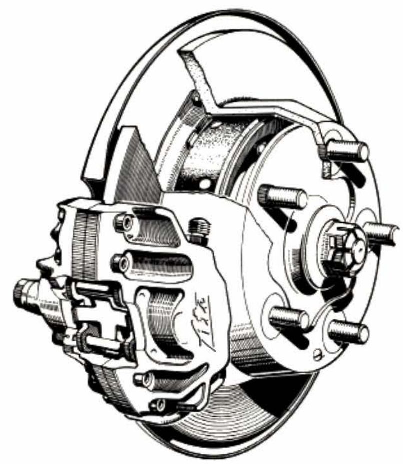
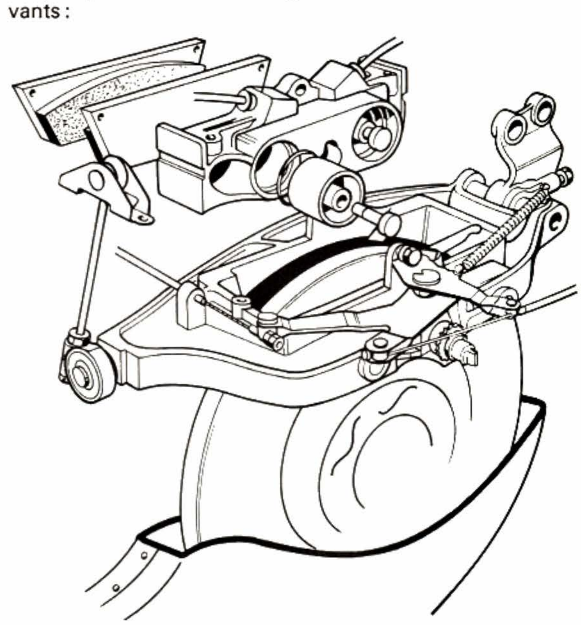


Fig. XX-11

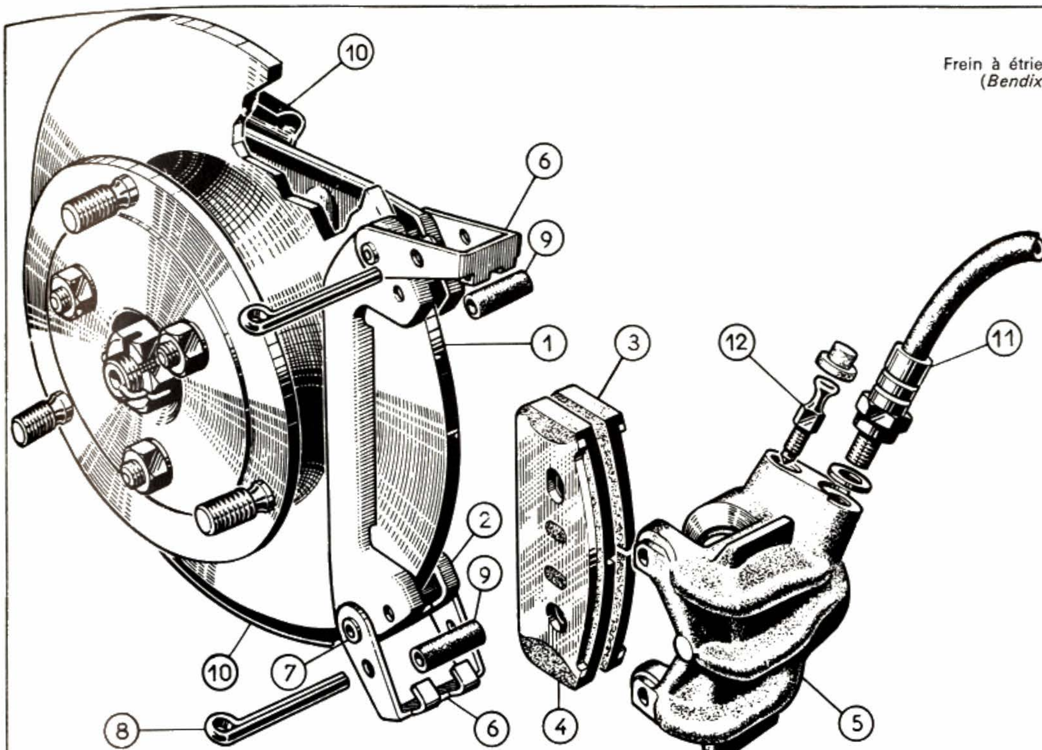
Frein mixte à disque et à tambour (pour le frein à main)

3.2.3. Comparaison frein à disque et frein à tambour. — Par rapport au frein à tambour, le frein à disque présente les avantages et les inconvénients suivants :



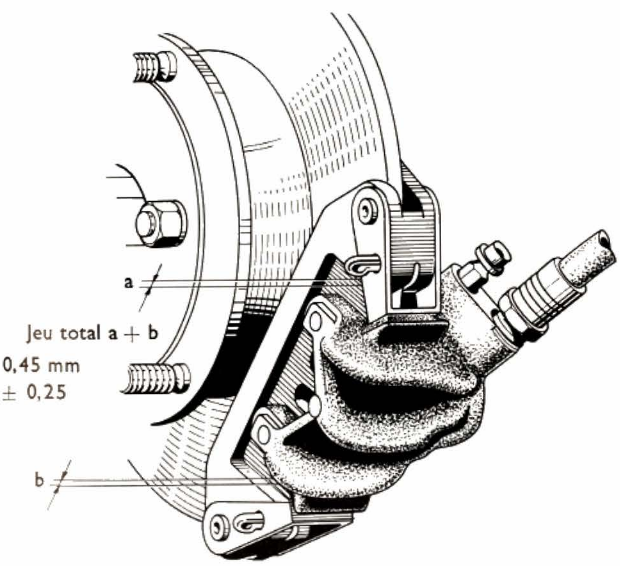
Frein à étrier articulé Citroën pour voiture DS 19 (*Ghobert*)

Frein à étrier flottant D.B.A.
(*Bendix-Lockheed*)



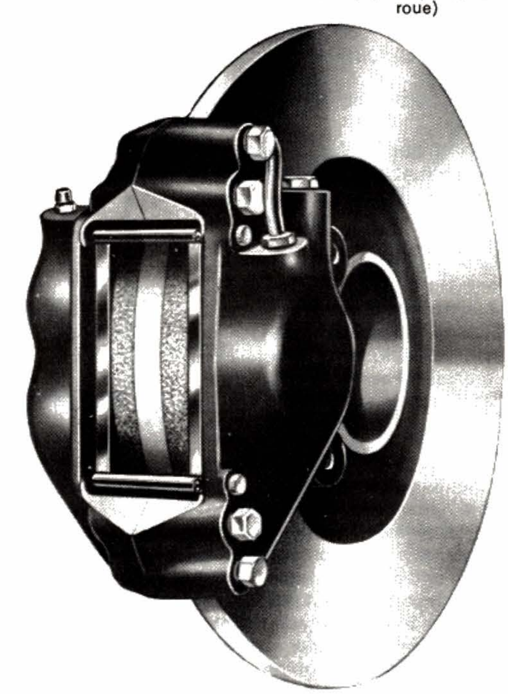
1. Disque - 2. Chape - 3. Patin intérieur - 4. Patin extérieur - 5. Étrier - 6. Cavalier - 7. Axe de cavalier - 8. Goupille - 9. Stabilisateur caoutchouc - 10. Déflecteur - 11. Flexible d'arrivée - 12. Vis de purge

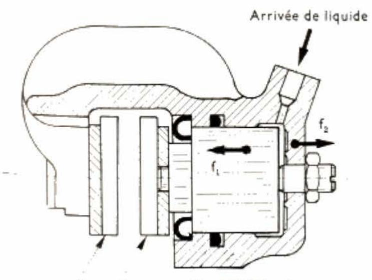
Exemples de freins à disque utilisés sur des voitures automobiles françaises



Détail du frein ci-dessus avec étrier en place

Frein Girling à étrier fixe à trois pistons (un, côté intérieur de la voiture, deux, plus petits, côté roue)





Frein à étrier flottant vu en coupe

1° *Avantages :* meilleure fidélité, meilleure progressivité, meilleure stabilité de route de la voiture en freinage, meilleure tenue du disque en conditions sévères.

2° *Inconvénients :* nécessité d'un servofrein (dispositif coûteux) pour un véhicule de masse moindre que dans le cas de freins à tambour. Mise au point restant quelquefois à faire.

Pour les voitures rapides et (ou) lourdes, les avantages l'emportent nettement sur les inconvénients quand la mise au point de ces freins a été bien faite.

3.2.4. Matériaux de frottement des freins à disque. — Comme les tambours, les disques sont en fonte perlitique. Quant aux garnitures, elles sont toujours du type « produits moulés », assemblés par collage lors de la fabrication (ou après celle-ci) contre des semelles en acier ou alliage léger contre lesquelles agissent les têtes de piston.

Leur niveau de frottement est réglable entre 0,25 et 0,50 suivant la qualité utilisée. Dans des conditions standards, il a la particularité d'être supérieur de plus de 30 % en moyenne, à celui des garnitures de freins à tambour dans une grande gamme de voitures (afin d'éviter, sous l'angle économique, l'emploi d'un servofrein ou d'en limiter l'importance).

4. COMMANDE DES FREINS

Actuellement tous les véhicules automobiles sont munis de freins sur toutes les roues ou sur les organes liés aux roues. D'après le Code de la route et pour des raisons évidentes de sécurité il y a obligatoirement deux commandes de freins indépendantes : l'une au pied, l'autre à main.

Généralement le frein au pied agit sur les quatre roues, c'est le freinage principal, tandis que le frein à main n'agit que sur un seul essieu ou sur le mécanisme. C'est le frein auxiliaire ou frein de secours.

Le frein à main sert également à immobiliser le véhicule à l'arrêt, grâce à un encliquetage qui permet de le laisser en position *serré*, d'où le nom qui lui est également donné de *frein de parcage*. Le dispositif qui relie la pédale ou le frein à main aux freins de roues constitue la commande proprement dite.

Il existe divers types de commande qui seront classées dans les trois grandes catégories ci-après :
— Commande mécanique.
— Commande hydraulique.
— Commande électrique.

4.1. Commande mécanique. — La commande mécanique n'est plus utilisée que pour le frein à main ou le frein de secours. L'action du conducteur sur la poignée ou le levier de frein détermine la rotation d'un axe horizontal appelé *palonnier ;* ce dernier porte, clavetées à ses deux extrémités, des douilles munies chacune de deux doigts sur lesquels viennent se fixer les câbles de frein. La rotation du palonnier détermine celle des doigts et, par suite, la tension des tringles ou des câbles fixés, par ailleurs, aux leviers commandant les cames de frein (fig. XX-12). Les câbles de commande sont soit du genre *Bowden*, ensemble de deux câbles d'acier enroulés en spirale, soit des tiges ou des rubans d'acier.

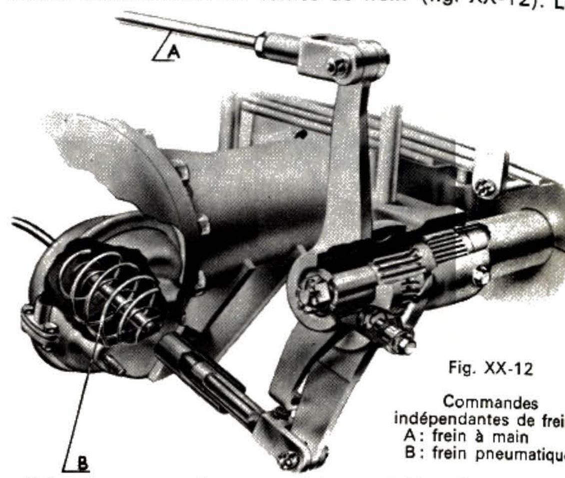


Fig. XX-12

Commandes indépendantes de frein :
A : frein à main
B : frein pneumatique

La commande mécanique présente l'inconvénient de nécessiter de fréquents réglages du fait de l'allongement des câbles, de la déformation des leviers et surtout pour corriger l'inégalité des temps de mise en action des freins sur chaque roue.

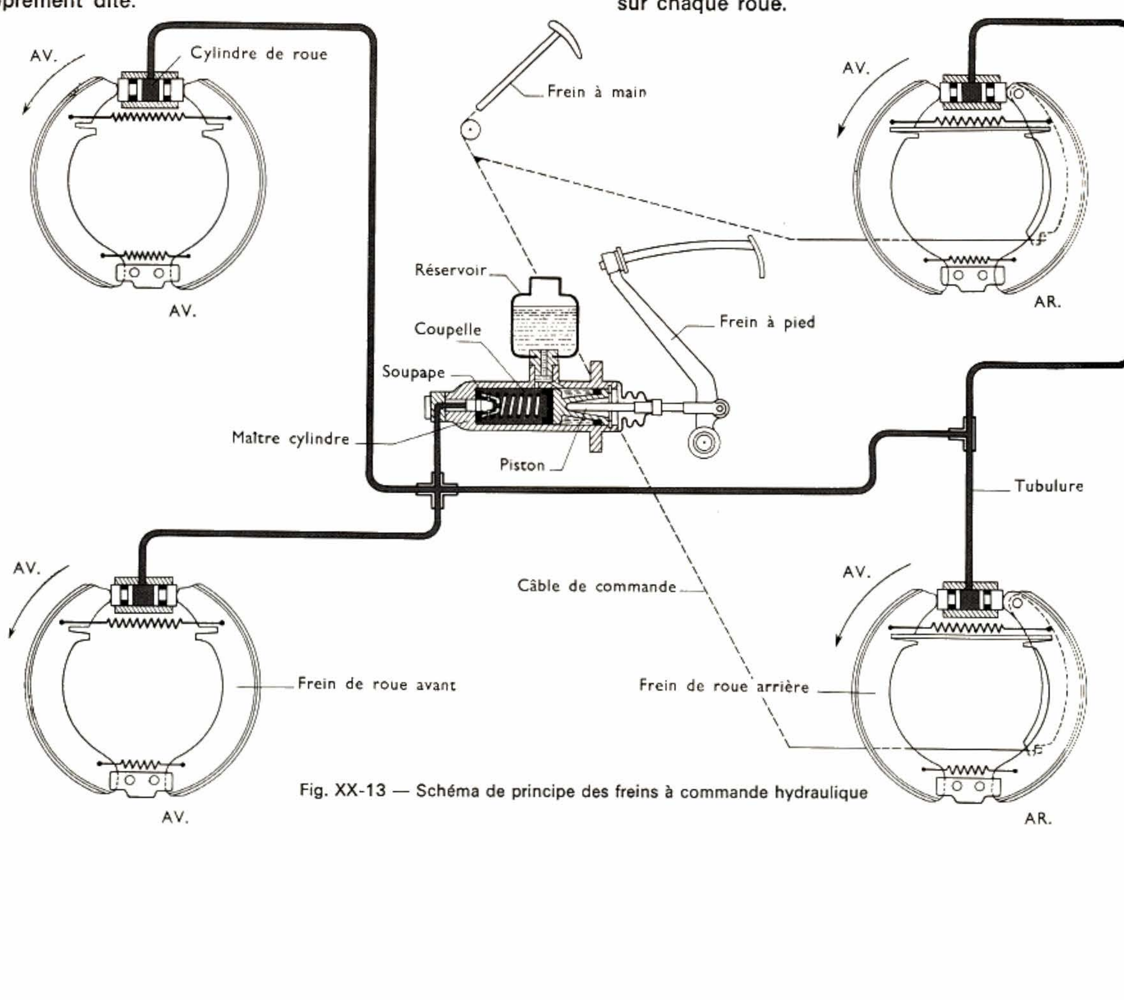


Fig. XX-13 — Schéma de principe des freins à commande hydraulique

4.2. Commande hydraulique. — C'est, de loin, la plus utilisée comme dispositif de commande du freinage principal. Ce procédé est généralement connu sous le nom de commande *Lockheed* (du nom de Loughhead, son inventeur en 1923).

La figure XX-13 (page précédente) donne le schéma de principe de la commande hydraulique pour des freins à tambour. Elle se compose essentiellement d'une pompe ou *maître-cylindre* (fig. XX-14) actionnée par la pédale de frein et de cylindres récepteurs placés dans chaque frein de

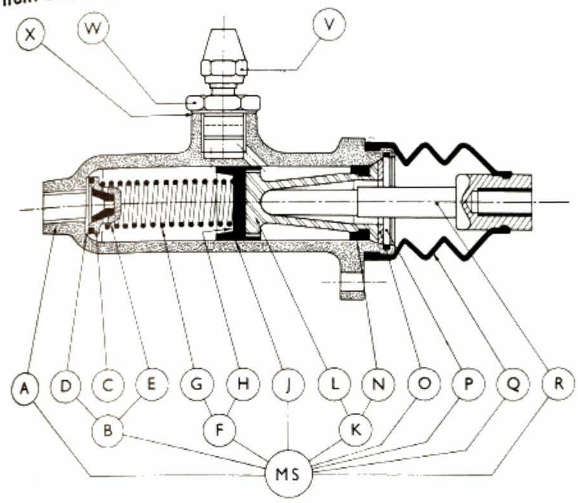


Fig. XX-14 — Maître-cylindre séparé

MS: maître-cylindre séparé complet
A: corps de maître-cylindre séparé
B: soupape complète
C: corps de soupape
D: joint de soupape
E: membrane de soupape
F: ressort complet
G: ressort nu
H: embout de ressort
J: coupelle principale
K: piston complet
L: piston nu
N: coupelle secondaire
O: rondelle d'arrêt de piston
P: jonc de rondelle d'arrêt
Q: soufflet
R: tige de poussée

roue. Chaque cylindre comporte deux pistons qui agissent respectivement sur chacune des mâchoires, jouant ainsi le rôle de la came (fig. XX-15). Maître-cylindre et cylindres de roues sont reliés par des canalisations étanches. L'ensemble est rempli de liquide. Grâce à l'incompressibilité de celui-ci, l'effort de la pédale est transmis par une colonne de liquide.

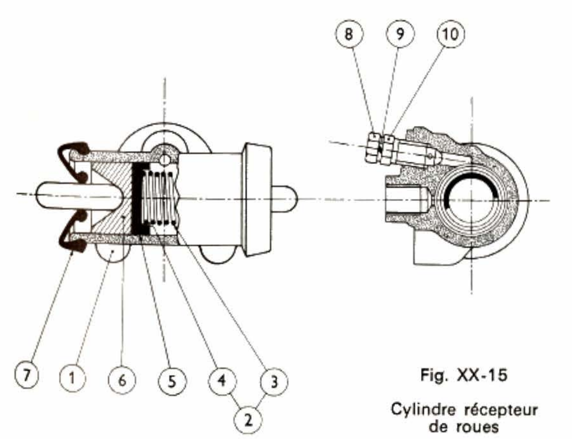


Fig. XX-15

Cylindre récepteur de roues

1. Corps de cylindre de roue
2. Ressort complet
3. Ressort nu
4. Embouts de ressorts
5. Coupelles
6. Pistons
7. Capuchons
8. Vis bouchon de purge
9. Rondelle
10. Vis pointeau de purge

La présence d'air en un point quelconque du circuit détruit l'incompressibilité et, par suite, une partie de l'efficacité du système. Dans ce cas, il faut chasser la poche d'air, c'est la *purge des freins*.

En cas de rupture de la canalisation en un point quelconque, le liquide fuit et le freinage est hors de service. Pour remédier en partie à cet incident, d'ailleurs rare, on réalise deux systèmes de freinage indépendants au moyen d'un maître-cylindre tandem : l'un des compartiments du maître-cylindre est relié aux cylindres récepteurs de l'essieu avant et l'autre à ceux de l'essieu arrière.

4.3. Commande électrique. — Le frein américain *Warner* utilise une commande électrique. Le dispositif comporte un électroaimant de forme circulaire supporté par le flasque solidaire de l'essieu, et une armature solidaire du tambour. Elle tourne avec celui-ci.

Lorsque le conducteur envoie le courant provenant de la batterie dans l'électroaimant, il tend à provoquer l'adhérence de l'aimant avec l'armature. Comme celle-ci tourne, elle tend à entraîner l'aimant qui va jouer le rôle de la came en appuyant sur l'extrémité de la mâchoire. L'adhérence entre l'aimant et l'armature est fonction de l'intensité du courant envoyé, ce qui permet au conducteur de doser l'effort de freinage.

4.4. Démultiplication des freins. — La théorie et l'expérience montrent que l'efficacité du freinage est maximale lorsque les roues sont à la limite du patinage mais tournent encore. Il en résulte que l'on doit obtenir sur chaque roue un *couple de freinage* sensiblement égal au *produit de la force d'adhérence de chaque roue par le rayon de la roue*, cela pour la voiture chargée au maximum.

On en déduit l'effort qu'il faut appliquer à la commande des mâchoires de chaque roue. La somme des efforts sur toutes les roues est l'effort total de freinage à obtenir. À l'autre extrémité du dispositif il y a l'effort exercé par le conducteur sur la pédale. Le rapport entre l'effort que l'on peut exiger du conducteur et l'effort total de freinage qu'il faut obtenir donne la valeur de la multiplication nécessaire de la commande.

4.4.1. Cas de la commande mécanique. — Cette multiplication est obtenue par des leviers. Dans ce cas, l'accroissement et finalement la multiplication se trouvent limités. Celle-ci est au plus égale au rapport qui existe entre le déplacement de la pédale et le déplacement des segments.

Le déplacement ou *course* totale de la pédale de frein sur une voiture automobile est voisin de 10 cm. Cette course totale se décompose en :

— Course dite *de garde* pendant laquelle la pédale s'enfonce sans agir (rattrapage des jeux de la timonerie, imperfections du frein et nécessité d'éviter une attaque trop brutale).

— Course dite *utile* ou efficace qui actionne réellement les freins.

— Course de *réserve* pour rattraper les usures et éviter des réglages trop fréquents.

Finalement, dans une commande mécanique la course utile est d'environ la moitié de la course totale, soit 5 cm.

La course du segment est voisine du millimètre. La multiplication maximale possible est donc proche de cinquante ; elle est obtenue par une combinaison de deux leviers. Sous peine de fatigue on ne peut exiger d'un conducteur, qui peut être une femme, un effort très supérieur à 15 ou 20 daN. L'effort total de freinage sera donc au plus égal à 1 000 daN. Dans le cas des véhicules utilitaires, la course totale de la pédale est plus importante — 10 cm — et on peut exiger un effort plus important de la part du chauffeur. Néanmoins, il ne sera guère possible de dépasser un effort final voisin de 2 000 daN.

4.4.2. Cas de la commande hydraulique. — La multiplication de l'effort du pilote peut être exprimée, soit par le rapport des surfaces du piston du maître-cylindre et des surfaces des pistons des cylindres récepteurs, soit par les déplacements de ces pistons, puisque le volume du liquide reste constant. C'est donc encore, en définitive, le rapport entre le déplacement de la pédale et celui des segments. Dans ce cas, il est plus grand que pour la commande mécanique, la course de réserve étant beaucoup moins longue. La course utile atteindra, par exemple, 60 à 70 % de la course totale.

4.5. Commandes perfectionnées. — Pendant longtemps les voitures automobiles ont été freinées en répartissant une fois pour toutes les efforts de freinage entre l'avant et l'arrière (compromis résultant du calcul des freins et des essais correspondants). Depuis quelques années on a cherché à épouser de plus près la réalité en utilisant des dispositifs tendant à exploiter au mieux l'adhérence au sol, en fonction, soit de l'état de charge du véhicule (masse), soit du ralentissement causé par le freinage qui, par le mécanisme appelé *transfert de poids dynamique*, change l'adhérence de chaque essieu en fonction de ce ralentissement, l'essieu avant étant surchargé et l'essieu arrière délesté de façon variable.

Ces dispositifs sont appelés *répartiteurs de charge* ou *compensateurs de freinage*, et sont intégrés à la commande. Nous pouvons rattacher également à cette question les *limiteurs* qui sont des systèmes très simples intégrés à la commande limitant, pour un essieu, la pression hydraulique des freins à un niveau déterminé ; si ce niveau a été bien établi cela permet d'éviter, par exemple, le blocage des roues arrière, c'est-à-dire de ne pas risquer le défaut dit de « tête-à-queue ».

Principe de fonctionnement d'un limiteur ordinaire de freinage : Pour une certaine pression de commande, c'est-à-dire une certaine décélération, un ressort préalablement taré de façon appropriée n'équilibre plus l'action de la pression et le piston vient obturer la canalisation et, en conséquence, la pression n'augmente plus dans la canalisation arrière (fig. XX-16). Ce dispositif n'agit qu'en fonction du ralentissement (ou de la pression de canalisation).

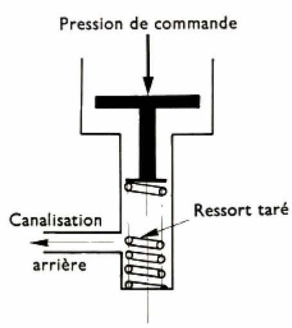


Fig. XX-16

(*D'après : Évolution du problème freinage auto*)

D'autres dispositifs agissent en plus en fonction de la charge en asservissant le tarage du ressort à la charge par un pontage extérieur. Au lieu d'obturer la canalisation arrière pour une certaine pression de commande on peut aussi ralentir, à partir de cette même pression, sa progression afin d'augmenter le rapport relatif de la pression dans les freins avant à la pression dans les freins arrière.

Pour cela on utilise un « piston différentiel » dont le schéma de principe est donné par la figure XX-17. Normalement

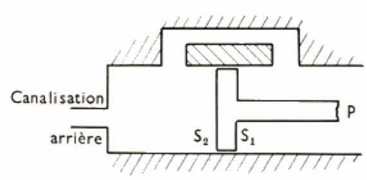


Fig. XX-17

Principe du piston différentiel
(*D'après : Évolution du problème freinage auto*)

la pression amont P est appliquée directement sur les freins arrière par le by-pass b. À partir d'une certaine pression P_0 elle n'est plus appliquée que de façon filtrée suivant le rapport des surfaces S_1 et S_2 et la pression arrière se modifie en fonction du rapport S_1/S_2 selon une loi de la forme $\frac{P_2 - P_0}{P - P_0} = $ Cte (P_2 pression arrière).

5. LES SYSTÈMES ANTIDÉRAPANTS OU ANTI-ENRAYEURS

Les systèmes correcteurs de freinage, théoriquement intéressants pour assurer la meilleure répartition possible de freinage en améliorant l'efficacité et la stabilité, sont impuissants à empêcher le blocage des roues en freinage ; or, ce blocage est la véritable bête noire des usagers car un véhicule automobile avec ses roues bloquées (partiellement ou complètement) perd (partiellement ou complètement) ses forces de guidage au sol. :

— ou bien il y a perte de contrôle de la trajectoire si l'on bloque seulement les roues arrière (tête-à-queue) ;

— ou bien il y a perte de la direction si l'on bloque seulement les roues avant ou les quatre roues simultanément.

Dans tous les cas il y a danger d'autant plus grave que la vitesse est plus grande. De plus, il y a augmentation importante de la distance d'arrêt, le frottement de glissement d'une roue bloquée sur le sol étant inférieur, environ d'un quart ou d'un tiers, au frottement avant glissement.

Il est possible d'éviter les effets de ce blocage en freinant de façon appropriée par la méthode dite du « pompage » dont l'efficacité repose sur l'art du conducteur : celui-ci, quand il sent les roues se bloquer, relâche alors la pédale de frein (pour débloquer les roues) et reprend le contrôle de son véhicule, en contrebraquant de façon progressive et appropriée si ce sont les roues arrière qui se sont bloquées ; ensuite il recommence à freiner, avec plus de prudence cette fois et, si le blocage se produit à nouveau, recommence comme ci-dessus, etc.

Cette méthode, souvent très efficace en pratique, n'est toutefois à la portée que d'un nombre restreint de conducteurs éduqués en conséquence et, de toute façon, souffre d'un certain nombre de critiques. Ainsi, d'une part, à grande vitesse on augmente la distance normale possible d'arrêt (la voiture avançant beaucoup pendant que le frein est débloqué) sans être certain du dosage du contrebraquage éventuel et, d'autre part, en cas de freinage de toute urgence cette méthode est inopérante, le conducteur — si éduqué soit-il — « écrasant » sa pédale de frein par réflexe et bloquant ses roues de ce fait.

Le but des anti-enrayeurs intégraux est, en conséquence, d'automatiser cette manière de freiner en supprimant ses inconvénients et en raccourcissant la fréquence action de freiner-relâchement du freinage.

Dans ce domaine, en exceptant le cas historique du vieux servofrein autorégulateur Hallot pour l'automobile, c'est l'aviation qui, la première, pour d'autres raisons que celles ci-dessus, a utilisé (et utilise toujours) des dispositifs anti-enrayeurs de roues et c'est avec ces dispositifs, malgré leur prix élevé, que l'intérêt de principe pour leur application à l'automobile a été démontré, notamment par les travaux de R. D. Lister au *Road Research Laboratory* en Grande-Bretagne. Parallèlement, des tentatives ont été faites pour une application de tels dispositifs ou d'autres dispositifs originaux (exemple : freins « autostables ») à un seul essieu pour en limiter le prix mais, pour des raisons diverses, ils n'ont pas eu de débouchés commerciaux.

Tous les dispositifs anti-enrayeurs intégraux reposent sur la connaissance du processus de blocage d'une roue freinée (travaux de Steel et Lister) : quand on augmente l'effort de freinage sur une roue, sa décélération — ou son ralentissement — augmente au prorata, passe par un maximum puis diminue, la diminution se produisant brutalement avec blocage de la roue et, pendant cette courte période, la roue ralentit plus vite que l'ensemble du véhicule en perdant en même temps la quasi-totalité de son adhérence latérale.

En conséquence, la plupart des anti-enrayeurs utilisent ce mécanisme : par des moyens appropriés mis en œuvre à partir de signaux liés à la vitesse ou à la décélération de la roue, le frein est relâché quand la roue commence à se bloquer puis est appliqué à nouveau dès qu'elle s'est remise à tourner, etc.

Divers moyens ont été recherchés pour rendre le procédé efficace sans être trop cher, sans qu'il y ait non plus d'autres inconvénients tels que perte sur la distance d'arrêt.

Après des essais de dispositifs mécaniques, pneumatiques, hydrauliques, ce sont les dispositifs électroniques qui, très récemment, se sont montrés les meilleurs et commencent à être montés en option sur certains types de voitures américaines ou européennes.

Leur principe commun, avec des variantes, est conforme au mécanisme décrit ci-dessus et est en gros le suivant (V. fig. XX-18) : des capteurs, placés sur chaque roue, trans-

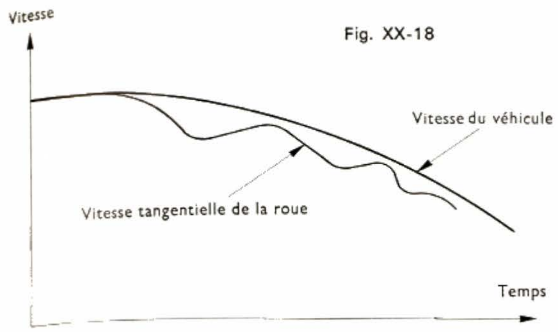


Fig. XX-18

mettent à une petite centrale électronique des indications sur la vitesse de la roue ; quand celle-ci devient presque nulle, c'est-à-dire que la roue tend à se bloquer, cette centrale délivre à des électrovalves le signal de commande du relâchement de la pression hydraulique du (ou des) frein intéressé. La roue recommence alors à tourner puis, à partir d'un certain seuil de vitesse, la centrale intervient de nouveau et commande par les électrovalves l'application de la pression hydraulique, etc. L'électronique permet ces opérations avec une très grande rapidité.

L'expérience présente également un intérêt limité mais certain, dans le freinage en virage et le maintien pour le conducteur, dans de larges limites, du contrôle de sa direction. Si les performances et les conditions économiques de fabrication permettent de les généraliser, ces dispositifs marqueront un progrès important dans la sécurité au freinage sans apporter toutefois une solution complète car, outre que leur effet est limité par le coefficient de frottement pneu-sol, ils sont sans action, ou d'action limitée, sur d'autres aspects (exploitation maximale de l'adhérence au sol des quatre roues, freinage en virage, instabilité en freinage par déports sans blocage de roues, etc.).

6. SERVOFREIN

L'effort du conducteur pour commander les freins est insuffisant à partir d'une certaine limite qui dépend de la masse du véhicule ainsi que des caractéristiques des freins eux-mêmes (plus ou moins autoserreurs). Cette limite a évolué dans le temps. Par exemple, alors qu'avant la seconde guerre mondiale on admettait pour les voitures particulières que l'effort du conducteur sur la pédale de frein puisse aller jusqu'à 60 daN pour pouvoir bloquer les roues, pour des raisons de confort et aussi du fait que beaucoup de femmes conduisent il n'est plus que de 25 daN environ aujourd'hui.

Les servofreins sont des dispositifs qui permettent d'aider le conducteur à freiner en remplaçant son effort (partiellement ou totalement) par celui que fournit une autre source d'énergie.

On dit alors que les freins sont « assistés ». Il y a divers types de servofreins : mécaniques (intérêt historique : ils utilisaient la force vive du véhicule pour assister l'effort du conducteur), électriques, pneumatiques, hydrauliques.

À titre indicatif, on utilise des servofreins pour les voitures particulières, équipé de freins à disque dès que la masse atteint environ 1 t et pour un véhicule utilitaire, dès que la masse atteint quelques tonnes.

6.1. Servofrein à dépression. — Nous en donnerons le principe. Quand le conducteur lâche la pédale d'accélérateur pour freiner, le papillon des gaz se ferme. Dans la tuyauterie d'admission il se produit une dépression qui peut atteindre plusieurs newtons par centimètre carré.

Si, en même temps, on met en communication la tuyauterie d'admission avec un cylindre muni d'un piston, ce dernier se déplace sous l'effet de la dépression et, s'il est lié à la commande des freins, il exerce un effort proportionnel à sa surface et à la dépression.

Divers servofreins (Westinghouse, Jourdain-Monneret, Dewandre-Repusseau) utilisent ce principe sur commande mécanique. Sur les commandes hydrauliques des voitures particulières, les dispositifs d'assistance utilisés couramment sont soit l'Hydrovac, soit le Mastervac, qui multiplient l'effort de freinage dans une proportion variable pour chaque véhicule mais généralement comprise entre 1,5 et 3. Ils sont également utilisés sur les camions de la gamme basse (quelques tonnes).

6.2. Servofrein à air comprimé. — La dépression dans la tubulure d'admission des réacteurs étant limitée, lorsque l'effort de freinage est grand il faut des pistons de surfaces importantes et l'encombrement du cylindre auxiliaire est notable (cas des poids lourds). Cela s'applique aux moteurs Diesel car dans ceux-ci également, la dépression est faible.

Cela explique l'emploi de dispositifs très analogues dans leur principe aux précédents mais dans lesquels l'air en dépression est remplacé par de l'air comprimé fourni par un compresseur entraîné par le moteur.

Des servofreins correspondants à air comprimé, comprenant plusieurs variantes selon le type de camions, sont très généralement utilisés sur les poids lourds et les ensembles tracteurs-remorques (particulièrement en France les systèmes Westinghouse).

6.3. Servofrein hydraulique Citroën. — Le système de freinage monté sur la voiture Citroën DS 19 agit sur les quatre roues par transmission hydraulique et constitue en outre un servofrein (fig. XX-19).

La pédale de frein commandée par le pied droit du conducteur agit sur deux distributeurs qui envoient aux cylindres actionnant les garnitures un liquide sous pression élevée provenant de deux accumulateurs hydrauliques particuliers (un pour les roues avant, l'autre pour les

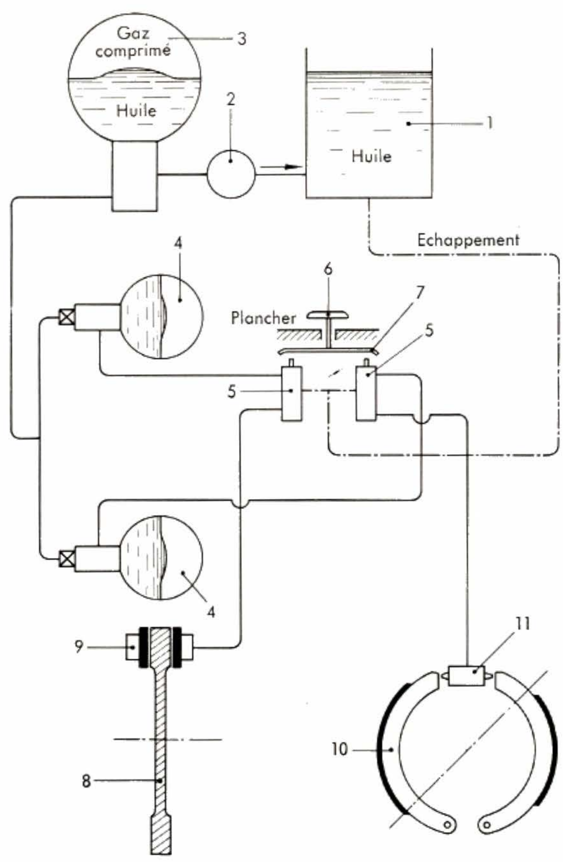


Fig. XX-19 — Schéma de servofrein hydraulique Citroën

1. Réservoir
2. Pompe haute pression
3. Accumulateur hydraulique principal
4. Accumulateur particulier sur circuits des freins avant et arrière
5. Distributeurs
6. Pédale de frein
7. Palonnier
8. Frein avant à disque
9. Cylindre de commande
10. Frein arrière à tambour
11. Cylindre de commande

roues arrière). L'efficacité du freinage est proportionnelle à la pression du pied sur les distributeurs, mais ceux-ci jouant le rôle d'amplificateurs, l'effort à fournir est peu important même en cas de freinage brutal. Les roues avant sont équipées de freins à disque montés à la sortie du différentiel et refroidis par un courant d'air canalisé depuis l'avant du véhicule.

Un dispositif automatique de rattrapage du jeu des garnitures des freins avant dispense de tout réglage pour compenser l'usure. Les roues arrière sont équipées de freins à tambour.

Les circuits de freinage avant et arrière sont indépendants et un répartiteur dose automatiquement les proportions d'effort de freinage sur l'avant et sur l'arrière en fonction de la charge sur l'essieu arrière qui, seule, est susceptible de varier beaucoup suivant le nombre des passagers et l'importance de leurs bagages. Le répartiteur a pour but d'assurer un freinage correctement équilibré dans toutes les conditions de charge.

7. FREIN DE RALENTISSEMENT

L'échauffement trop intense et surtout trop prolongé des garnitures amène une baisse importante du coefficient de frottement. Il peut arriver qu'à la suite d'une longue descente le véhicule soit privé de freins efficaces pour aborder le dernier virage. Des dispositifs de freinage, qui n'utilisent plus des systèmes à friction mais qui permettent cependant d'obtenir des décélérations acceptables, ont été imaginés pour remédier à ces incidents. Ce sont les freins de ralentissement ou ralentisseurs. Il en existe trois types principaux : frein-moteur, frein électrique et frein hydraulique. Tous ces freins de ralentissement permettent un freinage de ralentissement pouvant atteindre, dans certains cas, une valeur substantielle de décélération (1 à 2 m/s^2, par exemple).

Le frein électrique utilisant les courants de Foucault est particulièrement utilisé sur les cars de transport. La figure XX-20 donne un exemple d'une telle réalisation : le rotor, qui tourne avec la roue, se déplace devant un stator inducteur portant des électroaimants dont le courant d'excitation, fourni par la batterie, est réglé par le conducteur à l'aide d'un rhéostat. Les courants induits dans le rotor, qui s'opposent au mouvement du rotor et freinent donc celui-ci, sont d'autant plus importants que le disque tourne plus vite (V. t. 1, Électricité, chap. 25).

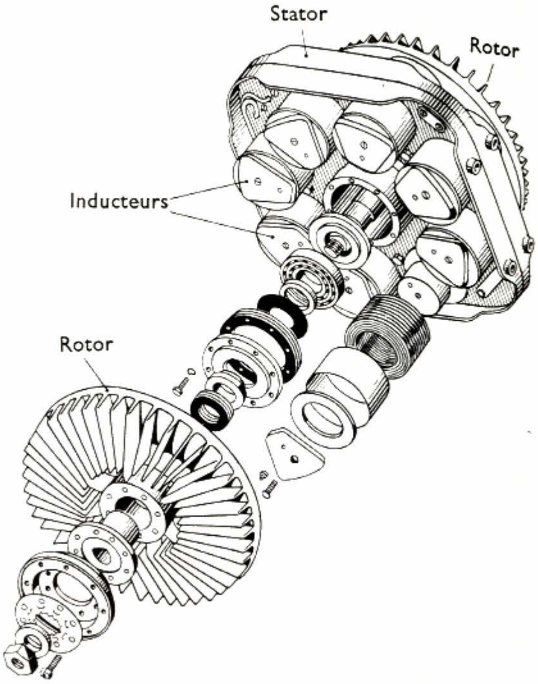
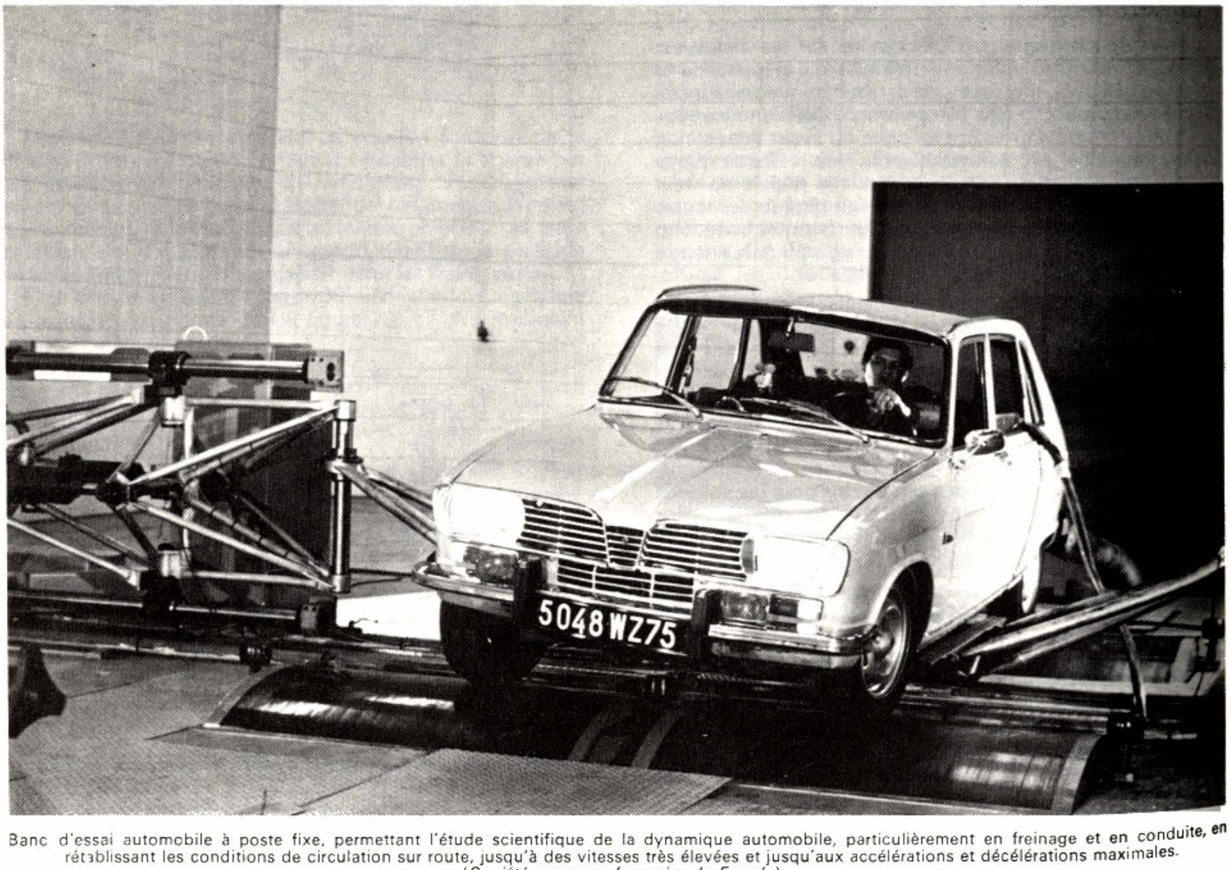


Fig. XX-20 — Ralentisseur Telma C. 120 à stator central et disques rotors latéraux



Banc d'essai automobile à poste fixe, permettant l'étude scientifique de la dynamique automobile, particulièrement en freinage et en conduite, en rétablissant les conditions de circulation sur route, jusqu'à des vitesses très élevées et jusqu'aux accélérations et décélérations maximales.
(Société anonyme française du Ferodo)

CHAPITRE XXI
LA DIRECTION

GÉNÉRALITÉS

Diriger un véhicule consiste à lui faire suivre un itinéraire choisi arbitrairement à l'avance. Cela ne peut se faire que si la direction est obtenue par un effort dont le conducteur est le maître, effort appliqué en un point fixe. Cette dernière condition impose de choisir le sol (1). C'est donc en agissant sur les roues que l'on dirigera un véhicule automobile.

Un véhicule en mouvement reçoit son impulsion des roues motrices ; cette force est parallèle à l'axe longitudinal de la voiture si les roues sont uniquement motrices. Lorsque la résistance à l'avancement est la même des deux côtés le déplacement a lieu en ligne droite.

Pour que le véhicule puisse décrire une courbe arbitrairement choisie, il faut appliquer un effort supplémentaire qui permet de modifier l'orientation des roues directrices à l'aide d'un dispositif, appelé direction.

1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE DIRECTION (fig. XXI-1)

1.1. Premier cas : l'essieu arrière est moteur. — Dans le cas d'un véhicule dont l'essieu arrière est seul moteur et le train avant seul directeur la poussée F venant des roues arrière est l'origine d'une poussée f arrivant à chacune des roues avant braquées : f peut se décomposer en deux composantes, l'une f_l dans le plan de la roue, l'autre f_t dans le plan perpendiculaire passant par son axe. Si l'adhérence transversale de la roue A_t est suffisante elle annule l'effet de cette force transversale en créant le point fixe indispensable et par suite seule f_l a un rôle actif. La roue tend à poursuivre sa route dans son plan. En décomposant f_l en deux composantes, l'une dans le sens longitudinal de la voiture, l'autre dans le sens perpendiculaire f_d, on voit que la force qui fait tourner le véhicule est la somme des deux composantes f_d (une par roue braquée). Ces deux forces tendent à faire tourner le véhicule autour d'un axe vertical passant par O milieu de l'essieu arrière, le couple actif étant égal à $2\,f_d\,E$ (E étant l'empattement).

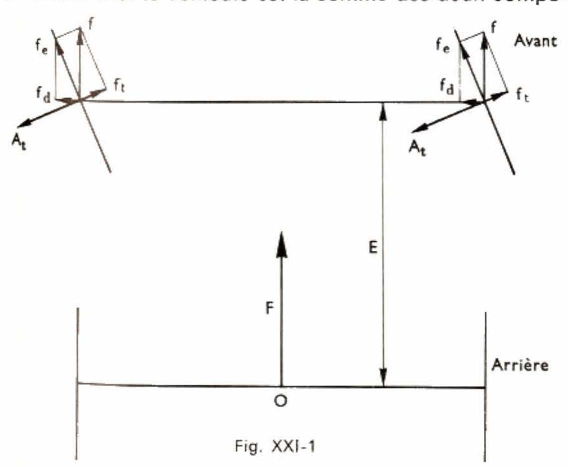


Fig. XXI-1

Forces permettant la direction

Le couple $2\,f_d E$ est maximal, quand $f_t = A_t$. Sur la figure on voit sans difficulté que $f_d = f_l \sin\alpha = fA_t \cot g\,\alpha$ $\sin\alpha = \rho + \cos\alpha$; le maximum de f_t étant A_t le couple de braquage est au plus égal à $2EA_t \cos\alpha$, moment de l'adhérence transversale des roues directrices braquées pris par rapport à O. Comme $f_l = f \sin\alpha$ le couple en fonction de f est égal à $2\,Ef \sin\alpha\cos\alpha = Ef\sin 2\alpha$, ce qui montre qu'avec des roues avant seulement directrices le couple maximal est obtenu pour $\sin 2\alpha = 1$ soit $\alpha = 45°$.

Ces considérations permettent les importantes conclusions suivantes :

a) Si l'adhérence transversale est nulle (sol glissant, masse insignifiant sur l'essieu directeur avant) il n'y a pas de point fixe : le braquage des roues avant ne sert à rien : le véhicule poursuit sa route en ligne droite. Si l'adhérence est comprise entre 0 et f_t le point fixe est précaire et le véhicule tourne mais les roues avant dérapent plus ou moins (le véhicule obéit mais mal). Si l'adhérence est supérieure ou égale à f_t le point fixe est bien déterminé et le véhicule obéit bien. L'angle de braquage donnant le couple maximal est alors de 45°, valeur qu'il est inutile de dépasser en cas de difficultés de direction.

b) Le véhicule ne peut obéir que si les roues arrière prennent des vitesses différentes. À moins d'avoir une voie étroite il faut un différentiel ; s'il est bloqué, le véhicule n'obéit pas, à moins qu'un demi-arbre casse ou que les roues arrière dérapent selon que l'adhérence est suffisante ou peu importante.

c) Si le véhicule est un multiroues, l'axe vertical de rotation étant entre les essieux moteurs il y aura forcément un certain dérapage des roues motrices malgré la présence de différentiels ; la direction sera donc moins efficace : rayon de braquage limité, direction plus dure.

1.2. Deuxième cas : l'essieu avant est moteur. — Dans le cas des roues avant motrices et directrices la poussée f est remplacée par un effort de traction T qui est toujours dans le plan de la roue (même si elle est braquée) et dont le module est plus grand que celui de f. Les forces qui tendent à faire tourner le véhicule sont limitées par l'adhérence longitudinale des roues et le couple qu'elles engendrent est égal à $2\,ET\sin\alpha$, valeur dont le maximum est obtenu par $\sin\alpha = 1$ soit $\alpha = 90°$. De là on déduit que rendre motrices les roues avant directrices permet d'augmenter les possibilités de direction ; on double l'angle de braquage, ce qui donne le couple maximal de braquage, et on élève la valeur maximale de ce couple moteur de Ef à $2\,ET$ avec $T > f$. La présence d'un différentiel sur l'essieu moteur avant est toujours indispensable.

Remarque : on peut concevoir une direction obtenue en freinant les roues du côté où l'on veut tourner ; ce procédé utilisé sur certains véhicules à chenilles intégrales, n'a donné lieu qu'à des projets sans suite pour le véhicule à roues.

(1) Un mode de direction constitué par une voile analogue à celle des bateaux est inconcevable en raison du manque fatal de précision, car il n'y a pas de point fixe.

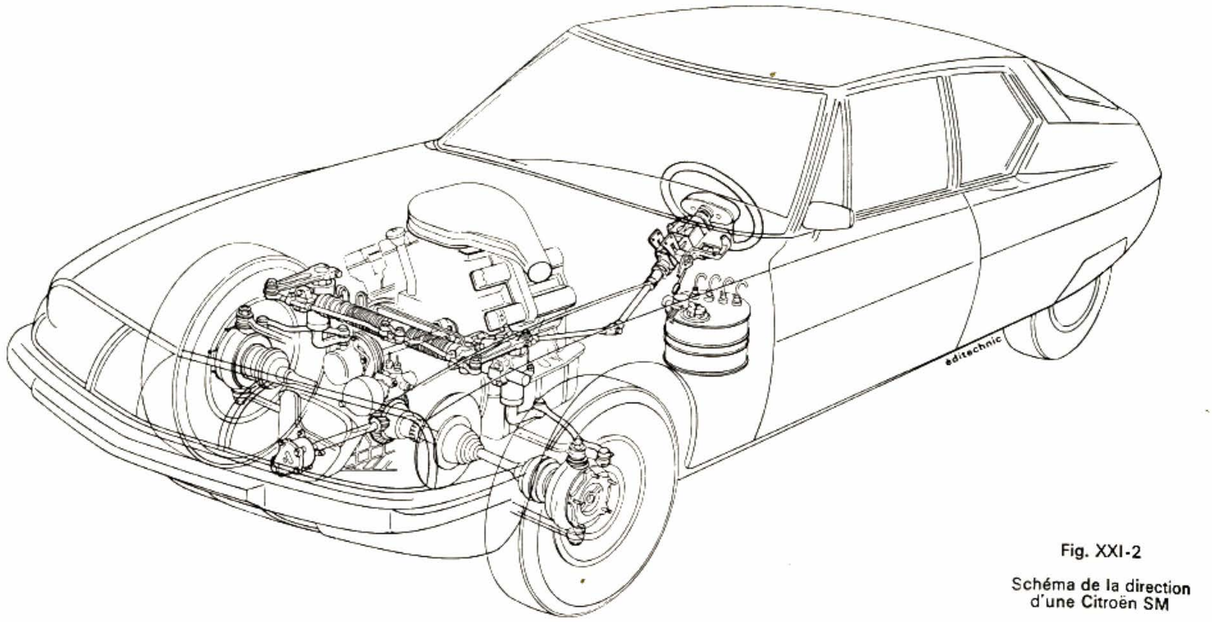


Fig. XXI-2

Schéma de la direction d'une Citroën SM

Dans un premier temps on va décrire les éléments précités avec seulement les détails nécessaires pour comprendre l'essentiel de leurs rôles. Il existe en effet de nombreux types de direction, un même type pouvant être aménagé dans le détail de différentes manières. On étudiera ensuite la géométrie de la direction.

2. DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL DE LA DIRECTION (fig. XXI-2)

Essieu rigide. — Les roues directrices peuvent être placées aux extrémités d'un essieu rigide que la direction fait tourner, l'axe de rotation se trouvant alors au milieu de l'essieu. De telles dispositions — pour les roues directrices — n'existent plus guère que pour des véhicules hippomobiles et pour certaines remorques à quatre roues (fig. XXI-3). Sur les voitures automobiles l'essieu avant

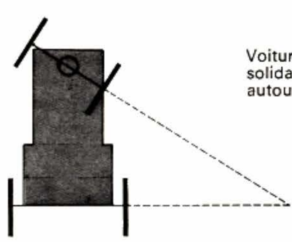


Fig. XXI-3

Voitures avec roues directrices solidaires d'un essieu pivotant autour d'un axe (cheville ouvrière)

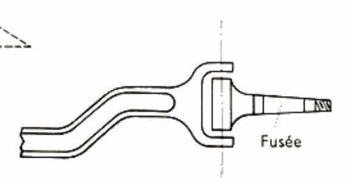
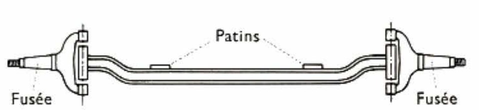


Fig. XXI-4 — Essieu rigide avant à chape ouverte (ci-contre) et à chape fermée (ci-dessous)



rigide est du type essieu brisé avec chape fermée ou chape ouverte pour l'articulation des roues (fig. XXI-4).

Roues indépendantes. — La plupart des voitures particulières sont équipées de roues indépendantes susceptibles de se déplacer avec un certain degré de liberté indépendamment l'une de l'autre. L'action de la direction s'effectue en partant du volant et du tube de direction qui agit par l'intermédiaire d'un dispositif contenu dans un boîtier.

Ce dispositif très courant fera l'objet d'une étude particulière.

2.1. Qualités d'une direction.

2.1. Qualités d'une direction. — La direction, élément essentiel de la sécurité, doit présenter un certain nombre de qualités. Parmi celles-ci on peut citer :

— La précision, qui permet au conducteur de passer exactement où il le désire ; par conséquent, seul un jeu minimal de fonctionnement est admissible.

— La stabilité, pour que la direction ait tendance à maintenir les roues non braquées.

— L'irréversibilité : les chocs et dénivellations ne doivent pas entraîner le braquage des roues (c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de réaction sur le volant).

— La douceur et la régularité de fonctionnement, pour que le volant puisse être tourné de façon continue sans effort exagéré de la part du conducteur.

— Une résistance à la rupture extrêmement grande donnant une sécurité presque absolue. Même pour les contraintes les plus grandes qui puissent être prévues les pièces constitutives d'une direction doivent plier ou se tordre mais non casser (pour cette raison elles sont en métaux résilients).

Par ailleurs, les mouvements des roues commandés ou permis, soit par la direction, soit par la suspension, doivent être totalement indépendants les uns des autres. En particulier, la suspension doit jouer sans entraîner ipso facto un braquage intempestif des roues (cette compatibilité des deux fonctions est étudiée au chapitre 22 puisque c'est la suspension qui doit se soumettre aux impératifs de la direction et non le contraire).

La question de savoir s'il est préférable de mettre la direction d'un côté ou de l'autre a été fortement controversée, les deux solutions ayant des avantages et des inconvénients. Il semble qu'actuellement on monte presque uniquement la direction du côté gauche du véhicule dans les pays où l'on circule à droite, du côté droit dans les rares pays où l'on continue à rouler à gauche.

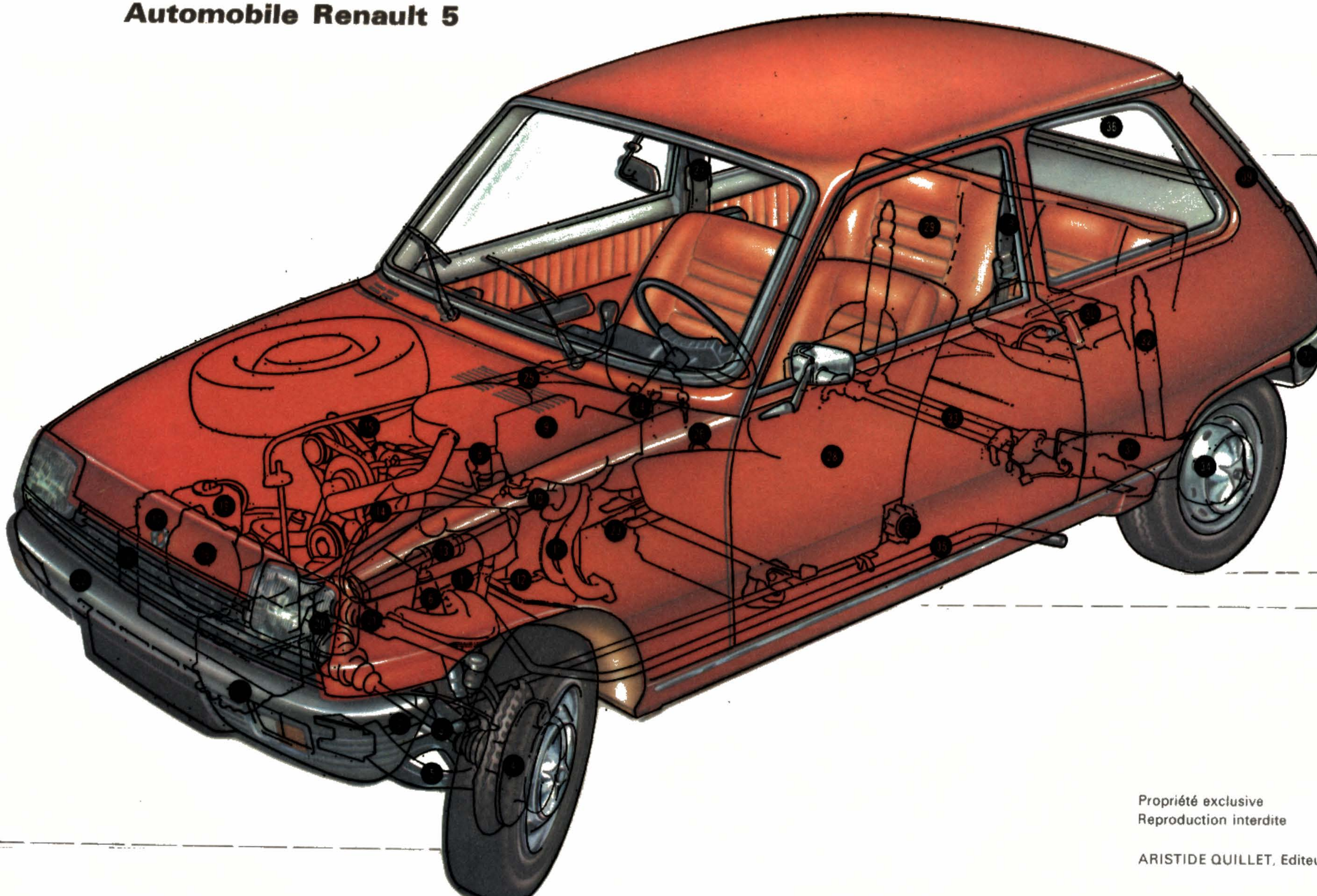
2.2. Types de direction - Réglages - Démultiplication. — On peut distinguer : les directions à vis, donnant lieu à divers systèmes (directions à billes) et les directions à crémaillère. Les servo-directions qui constituent des dispositifs complémentaires seront examinées séparément.

2.2.1. Directions à vis. — La vis liée à l'axe du volant agit par l'intermédiaire de pièces rattachées elles-mêmes au bras de commande. Ces éléments complémentaires peuvent être un secteur denté, un écrou, un pignon, un galet avec vis globique parfois. Il existe aussi des directions à billes circulantes dans la catégorie des directions à vis. Les croquis ci-après mettent simplement en évidence les principes de quelques types de directions à vis. Les sytèmes à vis

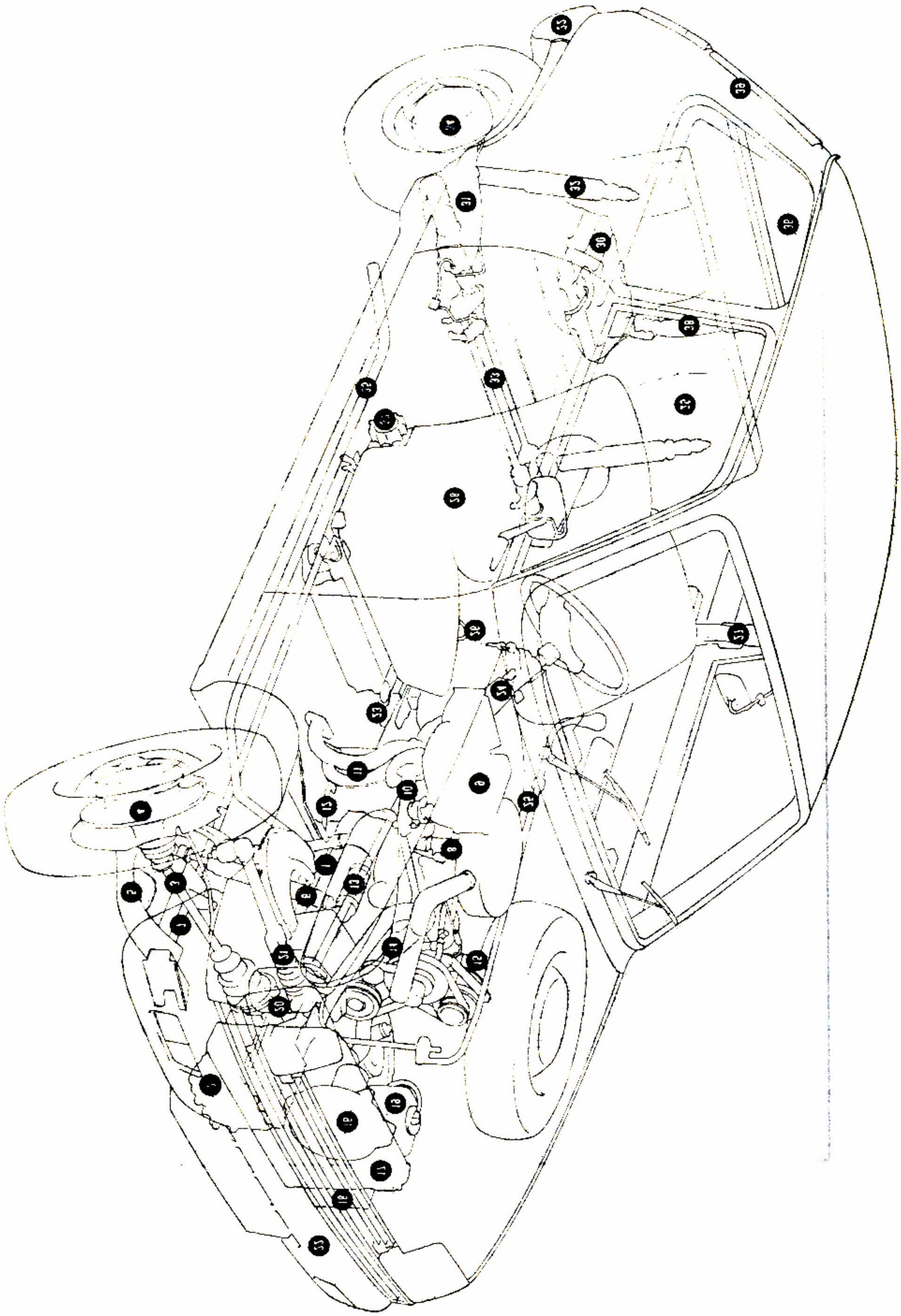
Automobile Renault 5

1. Moteur 4 cylindres en ligne
2. Boîte à 4 vitesses toutes synchronisées
3. Transmission par traction avant
4. Frein à disque
5. Triangulation de suspension avant
6. Amortisseur télescopique
7. Barre de torsion
8. Carburateur et filtre à air
9. Chauffage, ventilation
10. Maître cylindre
11. Pédalier de commande de frein et de débrayage
12. Pédale d'accélérateur
13. Démarreur
14. Pompe à eau
15. Alternateur
16. Ventilateur électrique de refroidissement
17. Radiateur à circuit hermétique
18. Batterie d'accumulateur
19. Réservoir de lave-glace
20. Bocal à niveau visible du circuit de refroidissement
21. Direction à crémaillère
22. Boucliers
23. Frein à main
24. Colonne de direction
25. Levier de commande des vitesses
26. Anneau d'ancrage des ceintures de sécurité
27. Ceinture de sécurité
28. Sièges avant réglables
29. Banquette arrière repliable pour former break
30. Réservoir d'essence
31. Bras arrière de suspension
32. Amortisseur télescopique
33. Barres de torsion
34. Frein à tambour
35. Tuyau d'échappement
36. Hayon arrière relevable (3e porte)
37. Réglage d'inclinaison des sièges avant
38. Glaces descendantes des portes avant
39. Évents de ventilation

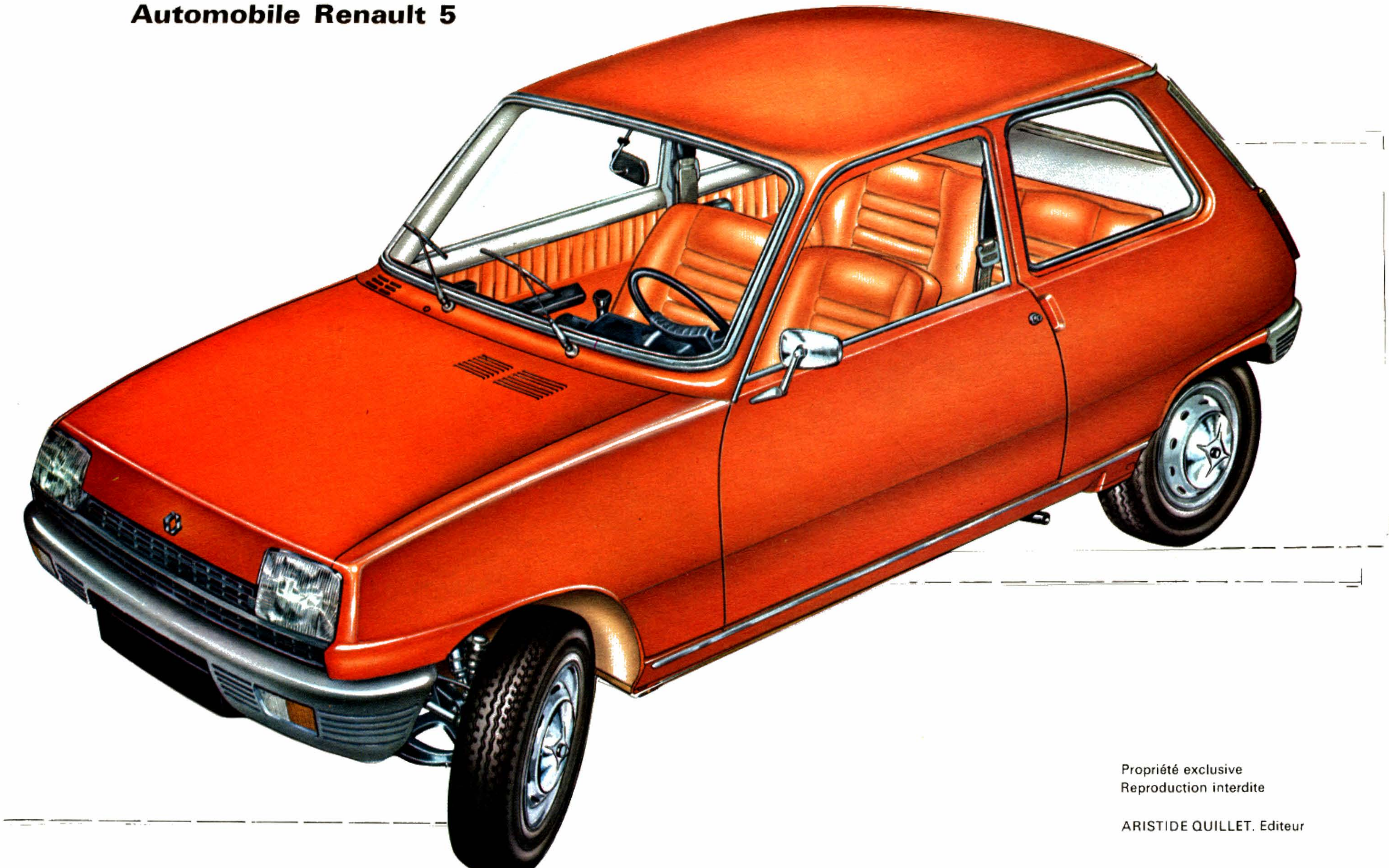
Automobile Renault 5



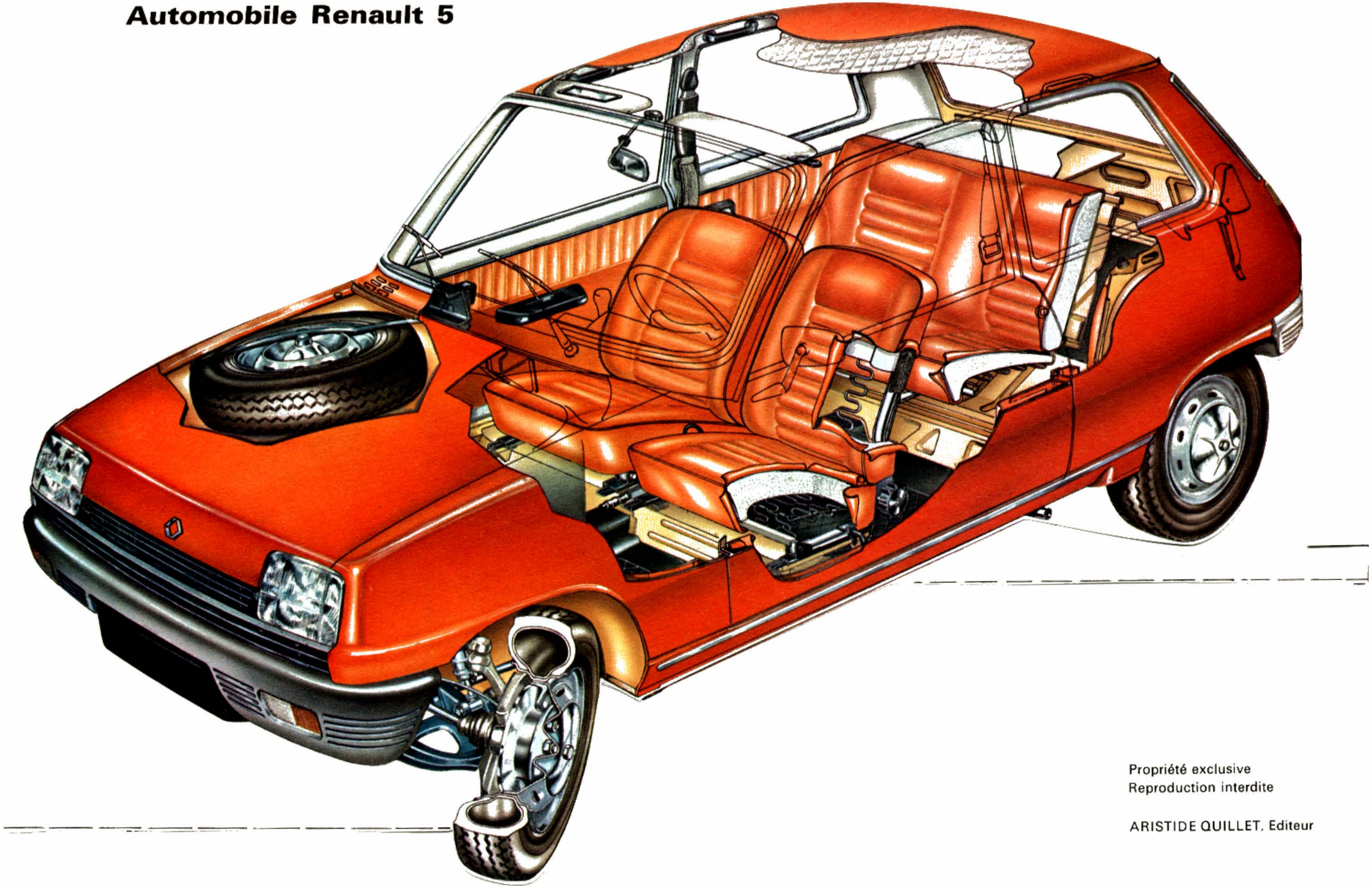
ARISTIDE QUILLET, Editeur



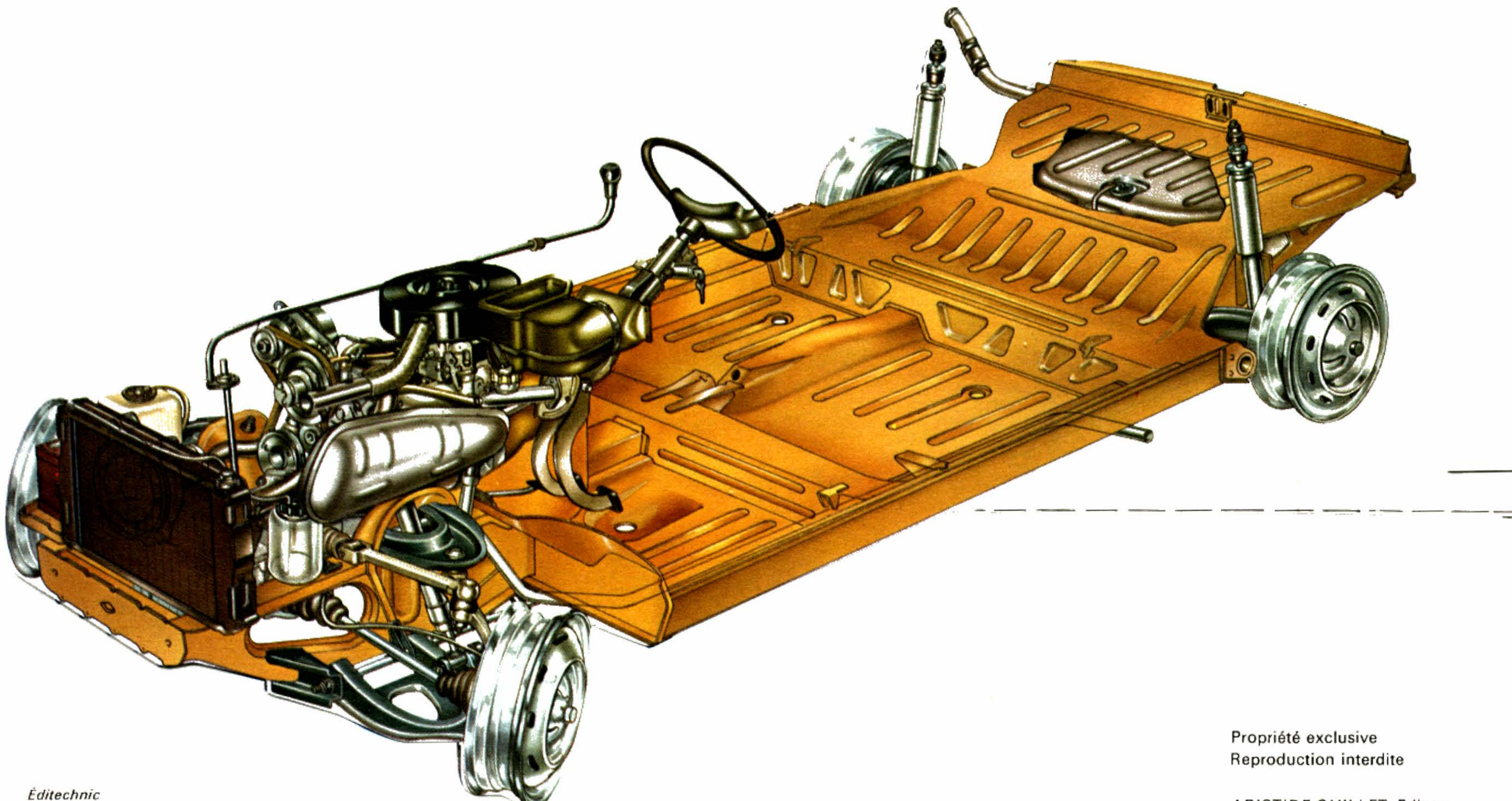
Automobile Renault 5



Automobile Renault 5



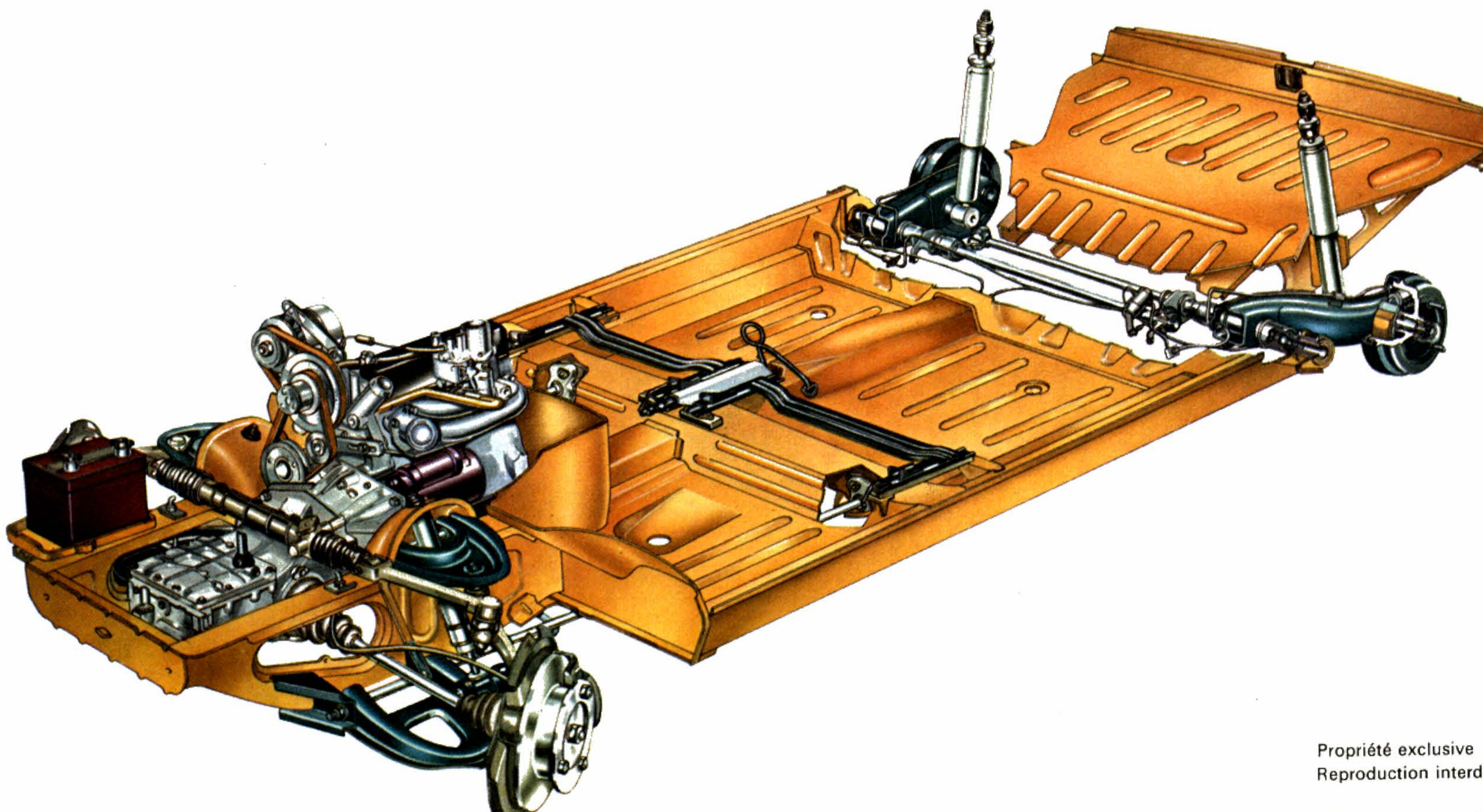
Automobile Renault 5



Éditechnic

ARISTIDE QUILLET, Editeur

Automobile Renault 5



Éditechnic

et galet tournant, à vis globique, à billes circulantes ont simplement pour but de réduire le frottement de la vis qui, dans les directions à secteur et à écrou, peut devenir excessif.

Dans chaque cas, il existe des détails de réglage ou de liaisons qui varient avec les constructeurs (fig. XXI-5 et XXI-6).

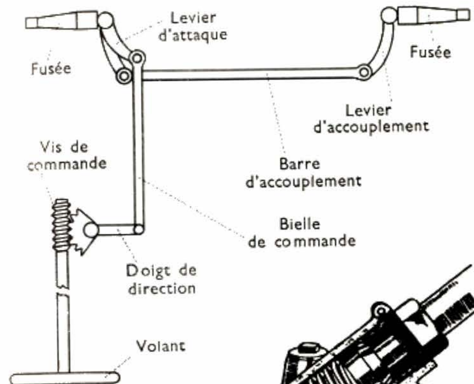


Fig. XXI-5

Tringlage de direction

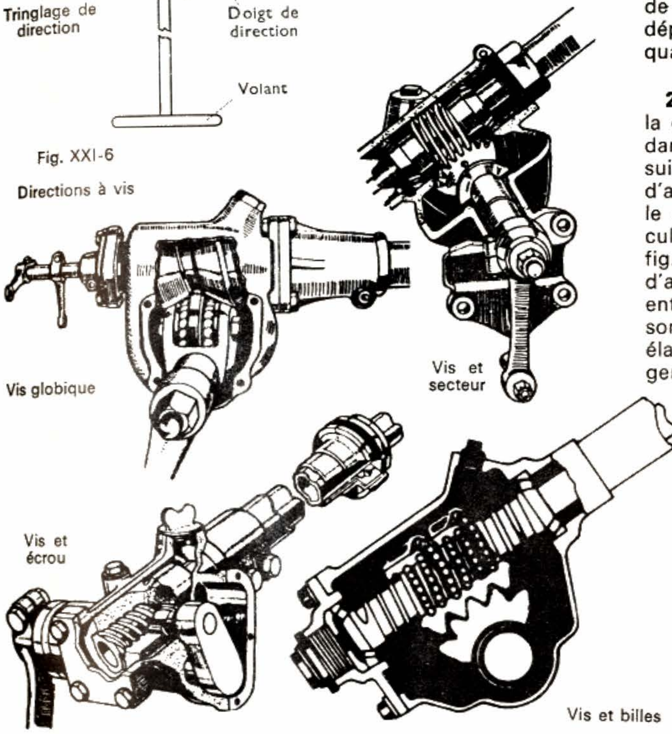


Fig. XXI-6

Directions à vis

2.2.2. Directions à crémaillère. — Il semble qu'actuellement, en France surtout, la direction à crémaillère soit le plus souvent employée, du moins pour les voitures particulières. La crémaillère est actionnée par un pignon lié à la colonne de direction ; il agit sur la crémaillère elle-même, dans la partie centrale de la barre d'accouplement (fig. XXI-7).

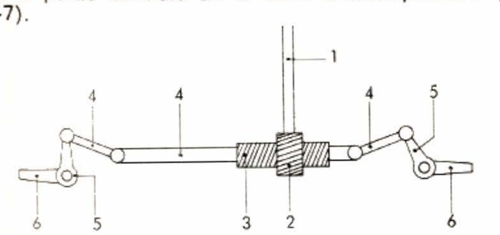


Fig. XXI-7 — Schéma d'une direction à crémaillère : 1. Tube de direction ; 2. Pignon ; 3. Crémaillère ; 4. Barres d'accouplement en 3 pièces ; 5. Leviers d'attaque ; 6. Fusées de roue

2.2.3. Réglages. — Des systèmes de réglage sont prévus entre les différents éléments contenus dans le boîtier, de même que pour les jeux, latéral ou longitudinal, qui concernent l'axe ou la vis de direction.

2.2.4. Démultiplication. — Les différents dispositifs précités, sommairement décrits, correspondent aux moyens employés pour obtenir une démultiplication convenable entre les roues directrices et le volant. La démultiplication est le rapport entre les angles décrits lors du braquage par une roue directrice, d'une part, et par le volant, d'autre part.

Ce rapport est compris généralement entre $\frac{1}{12}$ et $\frac{1}{25}$. Il peut varier en fonction de l'angle de braquage si, par exemple, la vis de commande est à pas variable. Il est cependant difficile d'en préciser les valeurs limites. En général la démultiplication est plus marquée pour les angles de braquage faibles. Comme la démultiplication réduit l'effort à fournir par le conducteur, on serait tenté de réduire aussi la valeur du rapport qui a été mentionné. Cependant, en exagérant dans un tel sens on pourrait, d'une part, rendre la direction moins précise, d'autre part, compliquer d'une manière excessive la réalisation et le réglage des différentes parties de la timonerie.

On rappelle que l'angle de braquage d'une roue est l'angle aigu de son plan médian avec le plan longitudinal de symétrie du véhicule. Cet angle, dont la valeur maximale dépasse rarement 40°, permet de définir le rayon de braquage correspondant.

2.3. Timonerie. — *Dans le cas des directions à vis,* la commande résultante de l'action du dispositif contenu dans le boîtier est transmise aux roues par les éléments suivants : doigt de direction, barre de commande, levier d'attaque pour la roue du côté du boîtier, roue qui transmet le mouvement à l'autre par la barre d'accouplement articulée sur chaque roue par un levier d'accouplement (V. fig. XXI-5). Dans le cas des roues indépendantes, la barre d'accouplement comprend deux parties. Les articulations entre la barre de commande et une barre d'accouplement sont réalisées par des rotules présentant une certaine élasticité ou parfois par des bagues de caoutchouc du genre silentblocs.

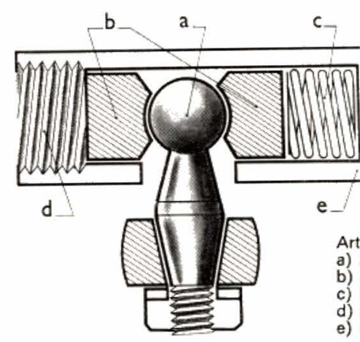


Fig. XXI-8

Articulation de direction
a) Rotule sphérique
b) Demi-coquilles
c) Ressorts amortisseurs
d) Filetage du bouchon
e) Bielle d'accouplement

— *Dans le cas des directions à crémaillère,* la barre d'accouplement comprend trois parties. La crémaillère, placée dans la partie centrale, est commandée directement comme on l'a indiqué. Les leviers de commande sont reliés aux deux parties extrêmes de la barre d'accouplement.

Un exemple de rotule de direction est représenté sur la figure XXI-8.

2.4. Servo-direction ou direction assistée. — Une telle direction comporte un dispositif auxiliaire qui, en utilisant l'énergie fournie par le moteur (compression d'un fluide par exemple), apporte au conducteur une aide notable. Ce dispositif est généralement hydraulique ou pneumatique. La force complémentaire que la servo-direction exerce dépend de l'action du conducteur sur le volant. On dit que la direction est asservie au conducteur. Grâce à un système de rappel un organe complémentaire facilite aussi le maintien du véhicule en ligne droite même aux grandes vitesses.

Exemple : direction à rappel asservi de la Citroën SM. Les schémas et commentaires fournis par le constructeur appellent quelques explications complémentaires.

Les figures XXI-9 et XXI-10 mettent en évidence le mécanisme du braquage (à gauche dans le cas de la figure). Les figures XXI-11 et XXI-12 montrent l'action du régulateur centrifuge et du piston de rappel.

Principe de l'asservissement au braquage

Un très faible mouvement relatif de rotation entre l'arbre de commande et le pignon de crémaillère entraîne la translation du tiroir T_1 qui met ainsi la chambre B en communication soit avec l'arrivée de pression, soit avec le retour au réservoir suivant le sens de rotation imprimé au volant, ce qui se traduit par une variation de volume de liquide dans la chambre B.

Il est à noter que la section de passage du liquide entre la chambre B et l'arrivée de pression ou le retour au réservoir est fonction de la vitesse de rotation du volant communiqué par le conducteur.

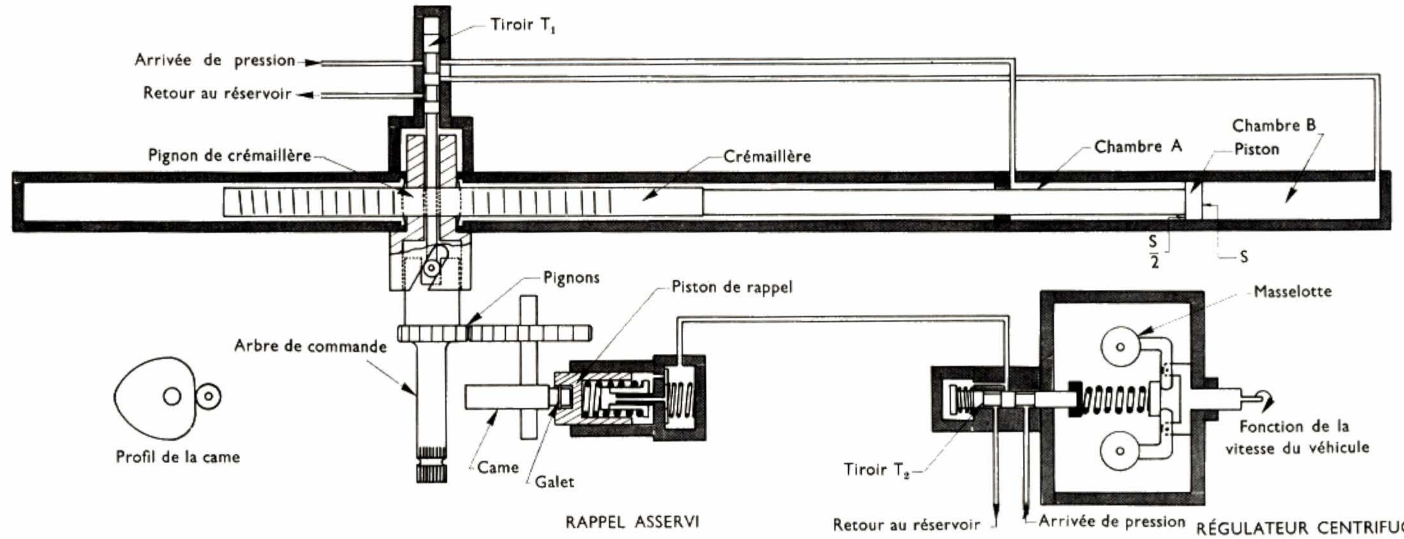


Fig. XXI-9 — Position neutre. Le piston de commande hydraulique de crémaillère est soumis à l'action de deux forces opposées et identiques :

1) chambre A : $F = P \cdot \frac{S}{2}$

2) chambre B : $F = \frac{P}{2} \cdot S$

Cet équilibre est constamment réalisé grâce au tiroir T_1.

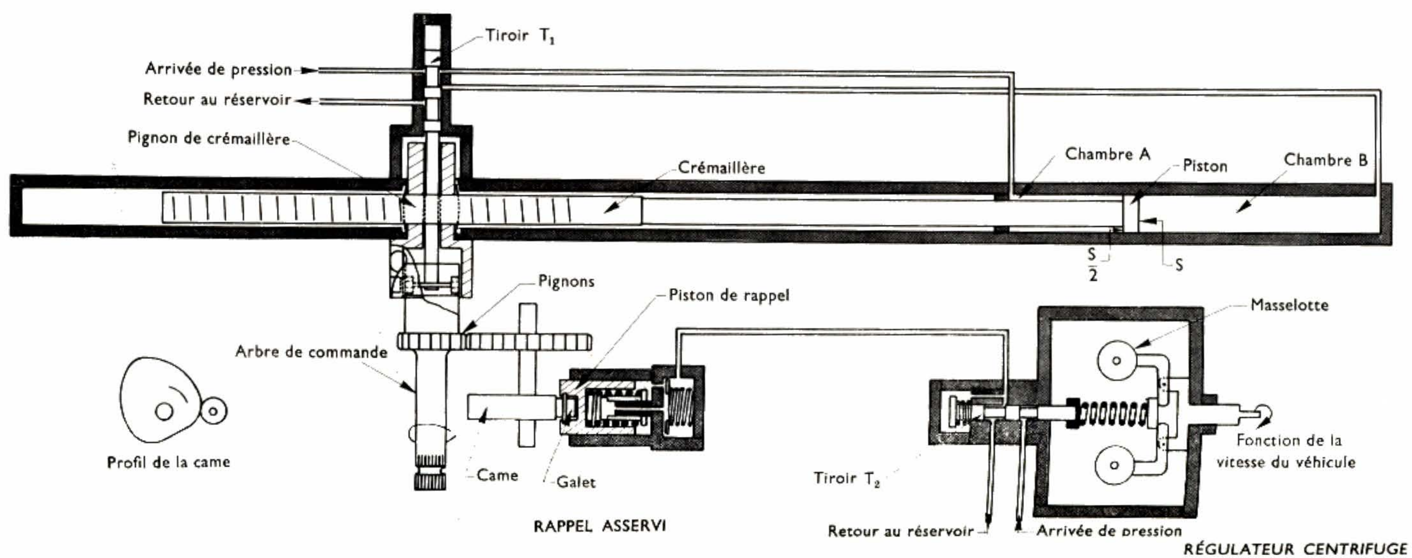


Fig. XXI-10 — Braquage à gauche.

La variation de volume de la chambre B (augmentation) exerce sur la section S du piston une force prépondérante qui déplace la crémaillère vers la gauche.

Cet asservissement très efficace ne laisse au conducteur qu'un faible effort à assumer au braquage, ce qui rend le véhicule très maniable en conduite de ville et facilite à l'extrême les manœuvres en garage.

Remarque

Grâce au profil de la came, l'effort croît avec l'angle de braquage, ce qui permet au conducteur une grande précision dans ses changements de direction.

Principe de centrage de la direction en ligne droite

Le très faible effort à exercer sur le volant de direction lors du braquage nécessite un centrage parfait de celle-ci en ligne droite afin d'obtenir une excellente stabilité.

De manière à conserver cette stabilité quelle que soit la vitesse du véhicule, l'effort de centrage, appliqué sur la came par le galet, croît en fonction de cette vitesse par l'intermédiaire du régulateur centrifuge.

Cette augmentation de l'effort de centrage apporte, en outre, une très grande sûreté lors des changements de cap à vive allure.

Le régime de rotation du régulateur de pression monté sur la face avant de la boîte de vitesses, est lié à la vitesse du véhicule.

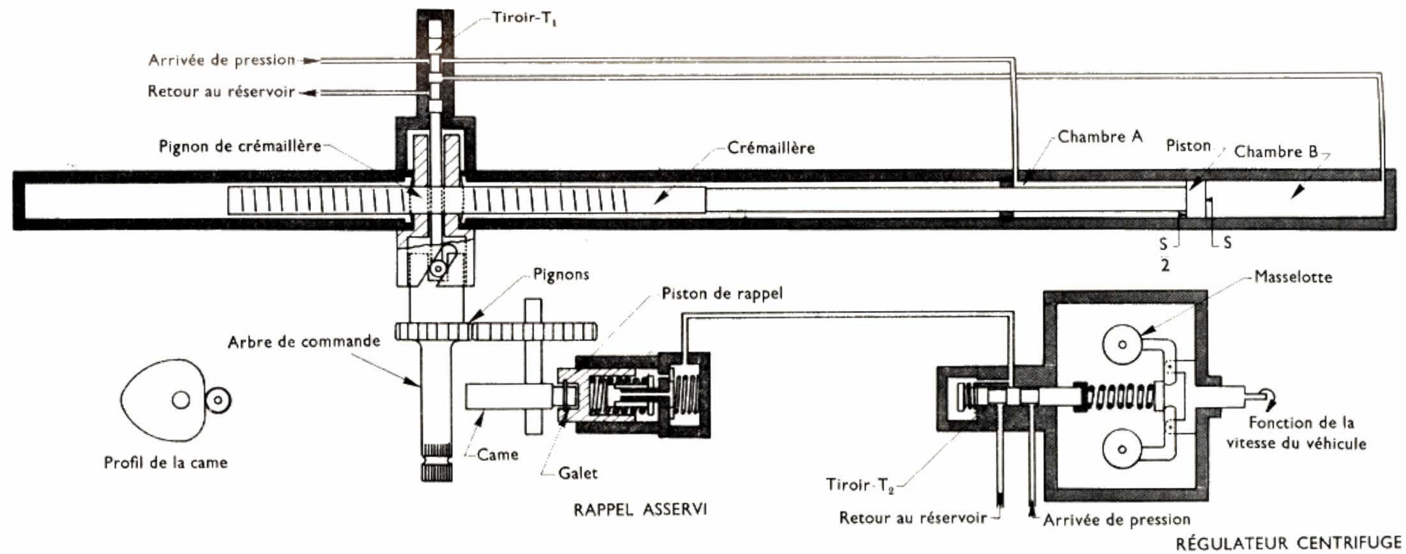


Fig. XXI-11 — Position neutre (50 km/h)

La pression fournie par le régulateur centrifuge agit sur le piston de rappel et permet ainsi le centrage de la direction en ligne droite.

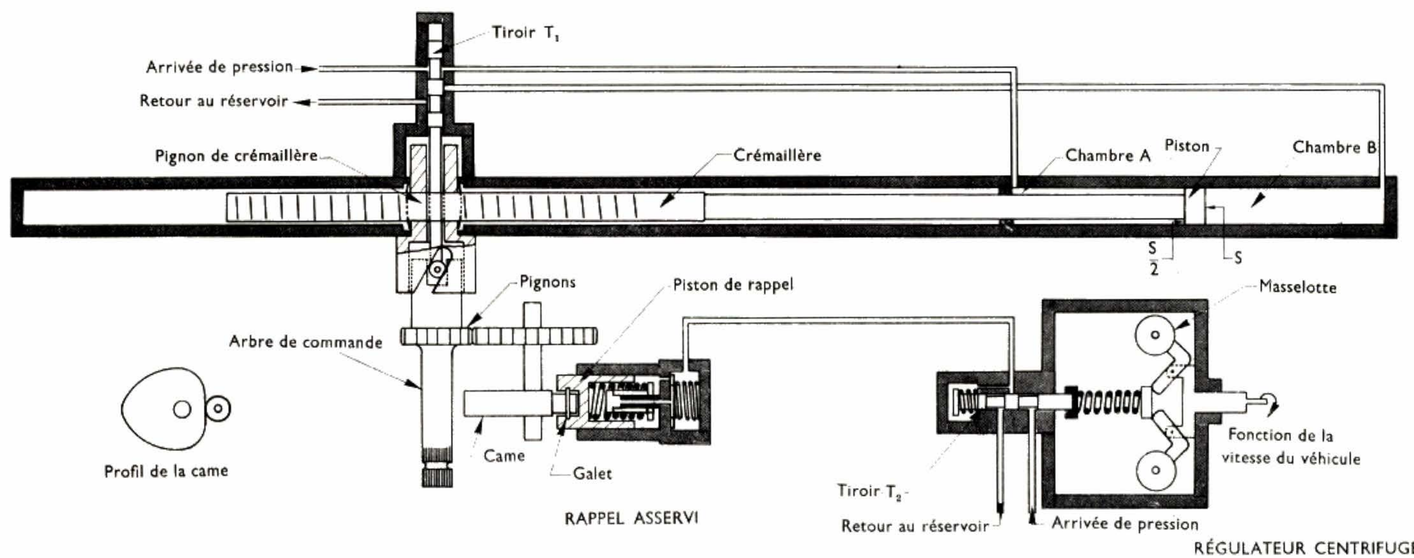


Fig. XXI-12 — Position neutre (200 km/h)

Sous l'action de la force due à l'inertie centrifuge, les masselottes s'écartent, le tiroir T_2 se déplace créant une augmentation de pression sur le piston de rappel, ce qui accentue de façon efficace le centrage de la direction en ligne droite.

Le liquide provient d'un réservoir où il est maintenu sous pression par une pompe commandée indirectement par le moteur; le liquide (huile spéciale) retourne au réservoir. Le tiroir T_1 est l'organe essentiel du distributeur (d'huile). Les chambres *A* et *B* constituent le cylindre de commande dans lequel se déplace le piston qui facilite le braquage (V. fig. XXI-9 et XXI-10). On note le déplacement relatif came-galet: le dispositif de rappel agit sur la commande, came et galet demeurent fixes (V. fig. XXI-11 et XXI-12).

2.5. Avantages et inconvénients des différents types de direction. — Dans le cas des directions à vis ou à billes circulantes les éléments de la timonerie sont plus nombreux. Cette circonstance donne plus de souplesse à l'ensemble et si les réglages sont plus longs ils sont individuellement plus faciles.

Avec la direction à crémaillère, plus simple dans son principe, les renvois sont moins nombreux et la précision est mieux assurée. On peut lui reprocher d'être moins souple que les autres types de directions par suite des réglages possibles moins nombreux.

2.6. Types de directions utilisées pour divers véhicules. — Les voitures françaises construites pendant les deux ou trois dernières années par les quatre grands constructeurs: Renault, Citroën, Peugeot, Chrysler-France ont utilisé la direction à crémaillère avec ou sans servo-direction.

Quelques constructeurs étrangers ont adopté sur certains modèles la direction à crémaillère:

- — Ford Capri 2300 GT (États-Unis d'Amérique)
- — Datsun 1800 (Japon)
- — VW Porsche 914 (République Fédérale allemande)
- — NSU R 080 (République Fédérale Allemande)
- — Différents modèles récents de Fiat (Italie)

Par ailleurs, Toyota 200 (Japon), Alfa Roméo 1300 (Italie) disposent d'une direction à vis et galet et parfois, en option, d'une servo-direction; Mercedes B 280 SE (République Fédérale Allemande) est équipée d'une direction à billes circulantes; Lancia 1,6 HF (Italie) a une direction à vis globique et galet; Opel Commodore GSE (États-Unis d'Amérique) a une direction à billes circulantes.

La servo-direction a été adoptée généralement sur les voitures Citroën construites depuis quelques années et de dimensions un peu importantes (SM, par exemple). Elles sont également prévues en option pour de nombreux véhicules du même constructeur et en option aussi pour des véhicules construits à l'étranger. Les servo-directions constituent un supplément de sécurité très appréciable pour de nombreux poids lourds et pour certaines voitures particulières.

3. GÉOMÉTRIE DE LA DIRECTION

On étudiera ici des caractéristiques géométriques qui interviennent essentiellement dans l'action extérieure de la direction, telles qu'elles se présentent sur les roues directrices, soit au repos, soit en mouvement.

3.1. Définitions relatives au train avant

3.1.1. Carrossage. — Angle aigu que fait une verticale avec le plan médian de la roue. Il est dit positif si le plan médian de la roue coupe le plan longitudinal de symétrie du véhicule au-dessous du sol, négatif dans le cas contraire (d'ailleurs exceptionnel). Il est égal à l'angle aigu que fait l'axe de la fusée avec une horizontale située dans un plan vertical passant par cet axe (fig. XXI-13).

3.1.2. Inclinaison de pivot. — Projection sur un plan perpendiculaire au plan longitudinal de symétrie du véhicule de l'angle que fait l'axe de pivotement de la fusée avec une verticale (fig. XXI-14).

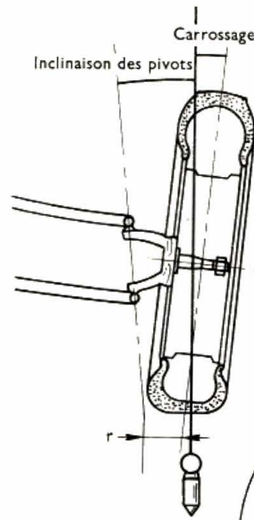


Fig. XXI-13

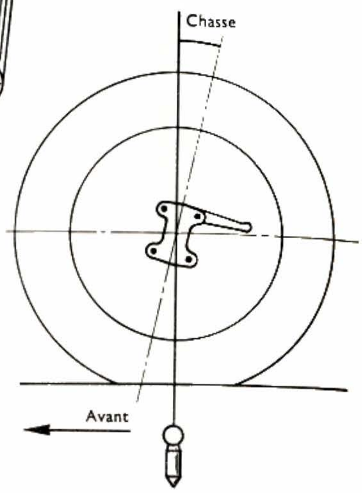


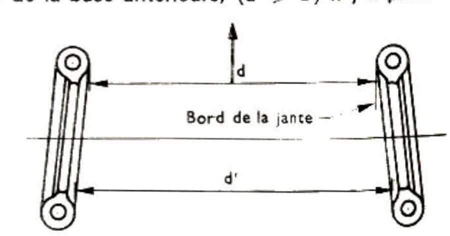
Fig. XXI-14

3.1.3. Chasse. — Projection sur un plan parallèle au plan longitudinal de symétrie de l'angle aigu que fait l'axe de pivotement de la fusée avec une verticale. Si la trace de l'axe de pivotement sur le plan d'appui est située en avant du centre de la surface de contact du pneumatique, on dit qu'il y a chasse positive ou en avant (V. fig. XXI-14); elle est négative ou en arrière dans le cas contraire.

3.1.4. Pincement ou ouverture. — Angle des traces à l'arrêt sur le plan d'appui horizontal du plan médian des roues non braquées; si le sommet de cet angle est situé en avant de l'essieu il y a pincement et ouverture dans le cas contraire. Dans tous les cas ce sommet doit se trouver dans le plan médian longitudinal de la voiture.

Pincement et ouverture peuvent être caractérisés par la différence *d*—*d'* qui peut exister entre les longueurs des deux bases d'un trapèze isocèle dont les sommets seraient les extrémités des contours intérieurs des jantes d'un même essieu. Si *d'*, longueur de la base postérieure, est supérieure à *d*, longueur de la base antérieure, ($d' > d$) il y a pince-

Fig. XXI-15
Pincement



ment; il y a ouverture dans le cas contraire (fig. XXI-15). En général, il y a pincement pour les véhicules à propulsion arrière et ouverture pour les tractions avant.

3.2. Rôle des angles caractéristiques du train avant. — Deux angles, le carrossage et le pincement fixent la position des roues. Les deux autres inclinaisons de pivot et chasse influent sur le fonctionnement de la direction. Tous les quatre jouent un rôle dans la tenue de route.

Le braquage des roues se fait par rotation autour de l'axe de pivot, ce qui entraîne un ripage sur le sol pour le pneumatique. Ce ripage est minimal et le couple de braquage est

aussi réduit que possible si l'axe de pivot coupe en son centre la zone d'impact du pneumatique sur le sol. Pour se rapprocher de cette solution idéale on est conduit à incliner l'axe du pivot dans le sens transversal, de l'« angle d'inclinaison de pivot », et à rapprocher du plan médian longitudinal de symétrie de la voiture la zone d'impact du pneumatique en inclinant la roue d'un angle de « carrossage » positif. Cet angle de carrossage positif n'est pas sans inconvénient : s'il est trop fort la bande de roulement porte sur le sol d'une façon dissymétrique (d'où une rapide usure anormale). De plus, dans un virage la force centrifuge tend à augmenter l'effort exercé sur la roue extérieure aux dépens de celui appliqué à la roue intérieure, tout en couchant les roues vers l'extérieur ; or, le carrossage de la roue extérieure tend à augmenter d'autant plus facilement que ce mouvement rapproche le centre de la roue du sol (fig. XXI-16) et donc le carrossage positif facilite le renversement. Si le carrossage

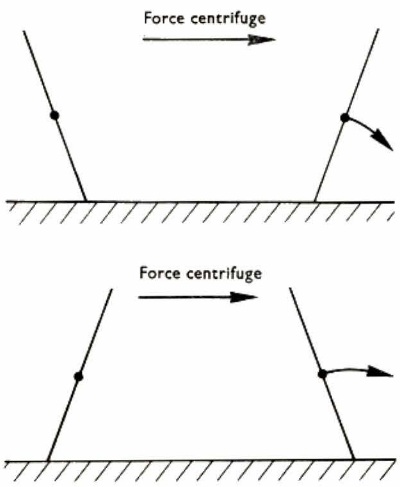


Fig. XXI-16

Carrossage positif : la hauteur du centre de la roue diminue

Carrossage négatif : la hauteur du centre de la roue s'élève

est négatif l'influence de la force centrifuge est contrariée par l'élévation du centre de la roue ; accessoirement, la voie (V. chap. 2) est augmentée, ce qui contribue à un accroissement de stabilité transversale. Finalement, le carrossage est toujours très faible ; il est souvent nul sur les poids lourds. En général il est positif sur les voitures particulières et il est négatif sur les voitures de sport très rapides. Il est à noter que l'on remarque actuellement une tendance à donner un carrossage négatif aux roues non directrices de certaines voitures particulières et de sport. Quant à l'angle d'inclinaison de pivot il est relativement assez fort, souvent voisin de 10 degrés, pour rapprocher le point de rencontre de la zone d'impact du pneumatique avec le sol. Il va sans dire que les angles de carrossage et d'inclinaison de pivot doivent être les mêmes pour les deux roues du train avant directeur à peine d'une tenue de route défectueuse. Il en est de même pour l'angle de chasse dont on va voir le rôle maintenant. Les réactions du sol sur un pneumatique admettent une résultante dont le point d'application est le centre de la zone d'impact, qui ne coïncide pas avec le point de rencontre avec le sol de l'axe de pivotement de la roue. Cette résultante crée donc un couple qui tend à braquer la roue. Au point de vue stabilité de la direction il est manifeste qu'il y a intérêt à faire en sorte que ce couple parasite tende à ramener la roue dans une position parallèle au plan médian longitudinal de symétrie de la voiture. Pour qu'il en soit ainsi il faut que le point de rencontre de l'axe de pivotement avec le sol soit en avant du centre de la zone d'impact si la roue est traînée (c'est-à-dire quand la résultante de la réaction est dirigée dans le sens contraire de la marche) et, qu'au contraire, il soit en arrière de ce centre si la roue est également motrice, la réaction du sol étant alors dirigée dans le sens de la marche. Cela s'obtient en inclinant l'axe de pivotement d'un angle déterminé appelé angle de chasse, soit vers l'arrière, soit vers l'avant. La chasse est généralement positive, même sur les « tractions avant », en raison de l'emplacement relatif des pivots et de l'essieu avant réel ou fictif. L'angle de chasse est toujours faible sinon, en marche arrière, la direction serait par trop instable.

Tant du fait de l'angle d'inclinaison de pivot que de la chasse, l'inclinaison de l'axe de pivotement fait qu'au braquage, la roue reposant sur le sol, la voiture tend à se soulever de l'avant. La réaction contre cet effort fait que, lorsqu'on lâche le volant, la direction « revient » c'est-à-dire que les roues tendent à reprendre d'elles-mêmes la position parallèle au plan médian longitudinal de symétrie de la voiture.

On conçoit que ces trois angles de position ont une influence sur la douceur, la précision et la stabilité de la direction donc sur la tenue de route. Ils sont l'objet d'un compromis établi par le constructeur après essais, compromis qu'il peut être amené à modifier après une certaine expérience en clientèle.

Pour que les pneumatiques s'usent le moins possible, il faut évidemment qu'ils roulent sans riper ce qui implique le parallélisme des roues en marche. Or, quoiqu'on fasse, les roues directrices, donc articulées, présentent un jeu de fonctionnement ; si faible qu'il soit les réactions du sol sur les roues tendent à les braquer du fait de ce jeu inéluctable. Donc, si les réactions tendent, en marche, à ouvrir les roues directrices, c'est-à-dire quand ces dernières sont traînées, il faut qu'à l'arrêt elles aient du « pincement » ; au contraire si les roues directrices sont également motrices, les réactions tendent à les fermer et il faut alors qu'elles accusent de « l'ouverture » à l'arrêt. Il est bon de remarquer que certaines voitures légères à roues avant indépendantes ne se déplacent pas parallèlement à elles-mêmes : elles ont une position qui dépend beaucoup de la charge. Cette particularité ne doit pas être perdue de vue quand on vérifie un train avant ou lorsqu'on roule avec un chargement dépassant de beaucoup la normale.

3.3. Réglage de la direction - Épure de Jeantaud.— Lorsqu'un véhicule prend un virage à rayon constant les centres des zones d'impact des roues décrivent des cercles concentriques : pour que ce mouvement s'effectue sans ripage préjudiciable aux pneumatiques il faut que les perpendiculaires élevées aux trajectoires des centres de zones d'impact des quatre roues soient concourantes

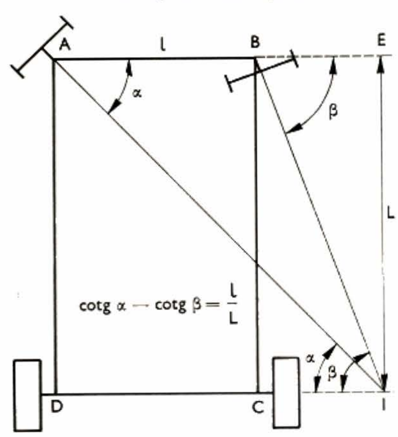


Fig. XXI-17

Épure de Jeantaud

(V. fig. XXI-17). Cette figure met en évidence que l'angle de braquage β de la roue intérieure est plus grand que l'angle de braquage α de la roue extérieure. Comme $\operatorname{cotg} \alpha = \frac{ID}{DA}$, $\operatorname{cotg} \beta = \frac{IC}{CB}$, $ID = IC + l$ et $DA = CB = L$ (l : voie, L : empattement) on déduit que $\operatorname{cotg} \alpha - \operatorname{cotg} \beta = \frac{l}{L}$. La différence $\alpha - \beta$ varie donc constamment avec α. Réaliser une timonerie d'attelage des deux roues telle que dans tous les angles possibles de braquage la loi $\operatorname{cotg} \alpha - \operatorname{cotg} \beta = \frac{l}{L}$ soit respectée n'est pas chose facile. Carlo Bourlet, professeur de mathématiques en a imaginé une théoriquement parfaite : elle nécessite 64 barres ! Pratiquement on se contente d'une solution approchée connue sous le nom d'épure de Jeantaud ou encore d'Ackerman. Elle consiste (V. fig. XXI-5) à relier les deux roues par un système de leviers d'accouple-

ment réunis par une barre d'accouplement. La direction des leviers d'accouplement est telle que leurs prolongements

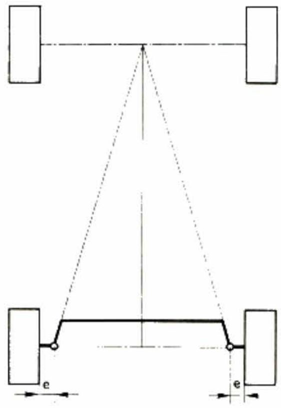


Fig. XXI-18
Réglage de la direction

se rencontrent au milieu de l'essieu arrière (fig. XXI-18). La longueur des leviers d'accouplement et, par suite, celle de la barre d'accouplement, sont choisies de telle sorte que l'approximation réalisée soit acceptable.

Dans ce qui précède on a admis implicitement que les roues étaient rigides ; or, elles sont munies de pneumatiques pouvant se déformer avant ripage et prenant, en particulier dans les virages, un angle dit de « dérive ». Cette propriété fait que dans un virage, le centre instantané de rotation, qui théoriquement est situé sur le prolongement de l'essieu arrière, est en réalité déplacé vers l'avant. Cela entraîne une altération de l'épure théorique de Jeantaud : les prolongements des leviers d'accouplement doivent se couper en avant de l'essieu arrière mais toujours dans le plan médian longitudinal de symétrie.

Dans le cas où les quatre roues sont directrices, les angles de braquage sont inversés. Par exemple, lorsqu'on braque à droite, les roues avant sont braquées à droite et les roues arrière à gauche. Le rayon du virage minimal est ainsi réduit et le cercle instantané de rotation est projeté en avant au voisinage du plan transversal de symétrie du polygone de sustentation. La maîtrise de la direction d'un tel véhicule est délicate. En effet, en virage chaque point (et en particulier le conducteur) décrit un cercle ayant le centre instantané de rotation comme centre. Si ce point est en avant ou au voisinage de la hauteur du conducteur celui-ci commence par s'écarter vers la gauche, quand le véhicule est braqué à droite ; croyant que le véhicule obéit mal le conducteur à tendance à en augmenter l'angle de braquage au point de dépasser le braquage convenable. Quand il s'en aperçoit, il contrebraque trop généreusement comme précédemment et pour la même raison. Il en résulte que le véhicule décrit une série de sinusoïdes dans le meilleur cas et va au fossé si le conducteur n'est pas confirmé. C'est pourquoi les véhicules rapides à quatre roues directrices sont agencés de telle sorte qu'il soit impossible de prendre la prise directe si les roues arrière ne sont pas bloquées dans la position marche en ligne droite.

3.4. Vérifications de la direction. Courbe d'erreurs.

Il est possible de montrer géométriquement, en construisant une courbe d'erreurs, dans quelles proportions la direction réalisée s'écarte de la loi qui veut que les quatre perpendiculaires aux quatre roues soient concourantes. On

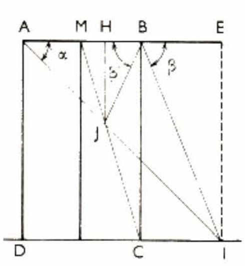


Fig. XXI-19
Points de la courbe d'erreurs

considère une valeur quelconque de l'angle α (fig. XXI-19). Soit I le centre instantané de rotation correspondant à cette valeur ; l'angle β, dans le cas où les normales sont concourantes, a une valeur telle que $\cot \alpha - \cot \beta = \frac{l}{L}$. Soit J le point où le segment MC coupe le segment AI et soit β' la valeur de l'angle $\widehat{ABJ}$. Il apparaît que :

$$\cot \alpha = \frac{AH}{HJ} = \frac{AM + MH}{HJ}$$

et :

$$\cot \beta' = \frac{BH}{HJ} = \frac{BM - MH}{HJ}$$

Comme $AM = BM = \frac{l}{2}$ et comme les triangles MHJ et MBC sont semblables, on trouve :

$$\cot \alpha - \cot \beta' = \frac{2\,MH}{HJ} = \frac{2\,MB}{BC} = \frac{2(l/2)}{L} = \frac{l}{L}$$

Dans ces conditions, l'angle β' c'est-à-dire $\widehat{ABJ}$ devrait avoir pour valeur β si l'on veut qu'il corresponde au cas des normales concourantes.

Dans la pratique et en dehors des valeurs moyennes de α, (20° environ), β est différent de β' ; la droite issue de B qui fait avec AB un angle égal au deuxième angle de braquage réel intérieur ne rencontre pas AI sur MC. Le point de rencontre correspondant est un point de la courbe d'erreurs.

On construit cette courbe (fig. XXI-20) en mesurant pour un certain nombre de valeurs de l'angle de braquage extérieur les valeurs correspondant à l'angle de braquage intérieur réel. Dans le cas de la figure XXI-18 la droite de référence MC correspond à un braquage à droite. Pour un braquage à gauche c'est MD qu'il faut considérer.

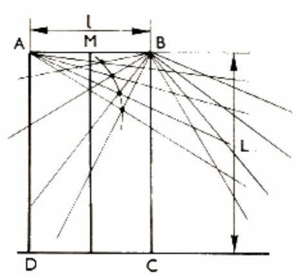


Fig. XXI-20
Courbe d'erreurs

La courbe d'erreurs ne doit pas être trop éloignée de la droite de référence ; on peut chercher à la modifier en rectifiant légèrement la longueur et l'orientation des leviers et de la barre d'accouplement ainsi que la voie.

La différence normale entre les angles de braquage extérieurs et intérieurs croît avec l'importance des braquages et naturellement avec la valeur du rapport $\frac{l}{L}$. À titre indicatif et sans donner à ces valeurs numériques un caractère absolu on peut observer les écarts suivants : pour $\alpha = 5°$, α étant la valeur d'un angle extérieur de braquage, $\beta = 5°\,20'$. Pour $\alpha = 15°$ on peut trouver dans les mêmes conditions $\beta = 17°\,15'$. Pour $\alpha = 20°$, $\beta = 24°\,10'$. Tout cela pour la même valeur de $\frac{l}{L}$.

3.5. Oscillations de la direction.

— Sans vouloir parler des défauts d'une direction correspondant à l'absence d'une des qualités énumérées plus haut, il faut parler de la tendance qu'elles peuvent avoir à l'amorçage ou à l'entretien de certaines oscillations dans le braquage des roues, avec ou sans interférence sur la suspension.

Les oscillations des roues constituent ce que l'on appelle le « flottement » et le « shimmy ». Le flottement est un mouvement de pivotement spontané et régulier des roues se manifestant en permanence et n'intéressant que les roues ; le shimmy est un pivotement intempestif et saccadé ne se produisant que dans certaines conditions et intéressant les roues et l'essieu. Le flottement peut être dû à un mauvais équilibrage des roues, d'où un certain balourd qui a tendance à soulever et à appuyer la roue d'un mouvement alternatif ;

de même il y a alternativement braquage à droite et à gauche. À certaines vitesses ce mouvement peut entraîner un phénomène de résonance avec la suspension. Ce flottement peut également être dû à une chasse trop accentuée ou à un jeu excessif dans la direction, ou à une direction trop douce car le conducteur a alors tendance à donner à son volant un mouvement alternatif, de part et d'autre de la bonne position qu'il ne sent pas en raison de la grande douceur de sa direction. Cette dernière cause a conduit à établir des servo-directions qui sont de moins en moins douces au fur et à mesure que la vitesse croît car la sensibilité des directions croît avec la vitesse.

Le shimmy est dû principalement à l'effet gyroscopique des roues. Une roue directrice est en effet assimilable à un gyroscope dont l'axe est astreint, non pas à passer par un point fixe du véhicule, mais à avoir une direction fixe tant que l'on n'agit pas sur le volant. Toutefois, il faut noter qu'il y a toujours un certain jeu dans les pièces, que le sol n'est pas rigoureusement uni, que les pneumatiques sont flexibles et que les roues ne se déplacent pas rigoureusement dans leur plan ; il en résulte des efforts verticaux alternatifs et une variation de la direction de l'axe de rotation. L'ensemble de ces efforts donnent naissance au shimmy. À certaines vitesses, dites critiques, ce mouvement est en phase avec les vibrations du moteur et les oscillations de la suspension : il est alors renforcé et peut devenir très brutal. Le shimmy cesse si l'on accélère ou si l'on ralentit l'allure. Le shimmy est apparu avec l'utilisation de pneumatiques à basse pression ; les pneumatiques sous-gonflés ou surdimensionnés sont particulièrement favorables à ce grave défaut. Si l'essieu est rigide il transmet les effets d'une roue sur l'autre ; le shimmy peut alors devenir si important qu'il est impossible de tenir le volant et la conduite devient dangereuse sinon impossible. Avec des roues indépendantes le shimmy n'intéresse qu'une seule roue et est en général moins fort qu'avec des trains avant à essieu rigide, surtout si les roues se déplacent dans leur plan. Dans tous les cas, quand une direction accuse du shimmy et même du flottement il est indispensable de conduire sans délai la voiture chez un réparateur aux fins de remise en état.

CHAPITRE XXII

LA SUSPENSION

GÉNÉRALITÉS

Le déplacement d'un véhicule donne lieu fréquemment à des phénomènes accidentels dus à des accélérations, à des freinages ou à des virages plus ou moins brutaux. Par ailleurs, peuvent apparaître des inégalités ou aspérités locales du sol de la route souvent inattendues. Ces phénomènes provoquent des secousses, source de fatigue pour les passagers et pour la voiture, et peuvent, à l'occasion des transports de marchandises, déséquilibrer un chargement. Il y a donc intérêt à réduire l'effet de ces secousses sur le châssis et la carrosserie. Tel est le rôle de *la suspension* qui, faisant suite à l'action des pneumatiques, doit limiter les effets des efforts aléatoires qui apparaissent dans un sens longitudinal, latéral et surtout vertical.

Qualités d'une suspension — Matériaux employés. — Une bonne suspension doit assurer :

1° La stabilité du véhicule en mouvement, en particulier, par le maintien de certaines caractéristiques géométriques des roues et de l'ensemble de la voiture. Par exemple, la voie et les angles qui intéressent plus spécialement le train avant doivent varier aussi peu que possible. Les bons systèmes de suspension doivent donc réduire l'importance de ces variations et les empêcher, si possible, d'apparaître.

2° Le maintien du contact des roues avec le sol.

3° La protection des passagers, de la voiture et du matériel transporté contre les chocs et vibrations pouvant prendre naissance en roulant.

Les limitations des oscillations ou déplacements accidentels de toutes orientations seront d'autant plus faciles à obtenir que le rapport du poids p des éléments non suspendus au poids P des éléments suspendus, c'est-à-dire $\frac{p}{P}$, sera petit. On entend par éléments non suspendus les essieux, le pont, les roues et les pneumatiques qui soutiennent les éléments suspendus, lesquels représentent le « reste » du véhicule, c'est-à-dire la partie mécanique, le cadre, la carrosserie et ce qui peut s'y rattacher ainsi que, bien entendu, les passagers et les marchandises chargées.

Les différents organes qui composent la suspension sont élastiques et complétés par des éléments susceptibles d'amortir les mouvements qui résultent des déformations non permanentes des matériaux utilisés pour réaliser l'ensemble de la suspension. Ces matériaux, souvent métalliques, sont surtout des aciers spéciaux. Le caoutchouc intervient fréquemment soit directement, soit pour des raccords ; des fluides liquides ou gazeux sont employés dans certains types de suspension.

L'étude de la suspension nous conduit à décrire les différents systèmes existants et dans quelles conditions ils remplissent leur rôle. Auparavant, nous étudierons des éléments qui interviennent dans tous les systèmes ou presque et, pour terminer, des dispositifs qui complètent les actions précédentes. La figure XXII-1 (ensemble mécanique Chrysler 160 — 160 GT — 180) fait apparaître du côté gauche du véhicule les suspensions avant et arrière, mettant en évidence les ressorts hélicoïdaux.

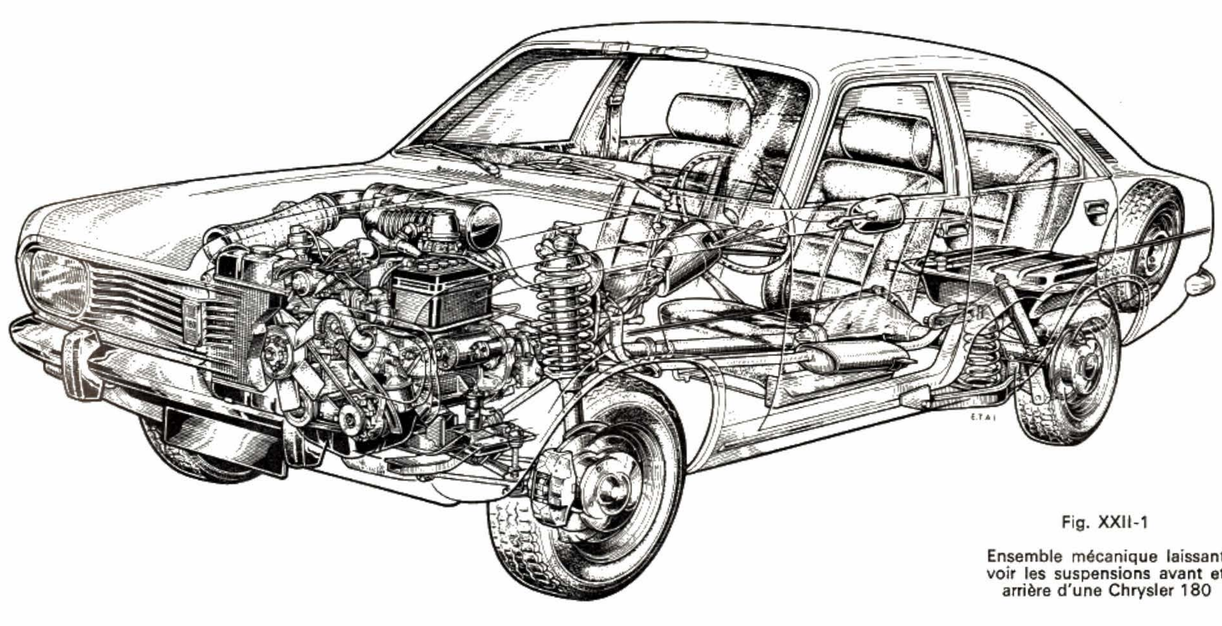


Fig. XXII-1

Ensemble mécanique laissant voir les suspensions avant et arrière d'une Chrysler 180

1. RESSORTS

Ce sont des éléments élastiques qui jouent un rôle essentiel dans de nombreuses suspensions. L'acier surtout est utilisé pour leur réalisation.

1.1. Ressorts à lames. — Ce sont des lames d'acier de longueurs décroissantes, assemblées par un boulon central et maintenues aussi par des étriers à la lame principale, la plus longue, dite aussi *lame maîtresse*. Celle-ci est articulée à ses extrémités, soit au châssis, soit à l'essieu.

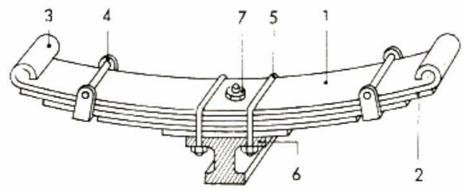


Fig. XXII-2 — Ressort droit

1. Lame maîtresse; 2. Lame de renfort; 3. Œil; 4. Collier de serrage ou étrier; 5. Brides; 6. Patin de l'essieu; 7. Boulon étoqueau

Un ressort à lame est dit droit lorsque sa concavité est tournée vers le haut, la lame maîtresse étant alors placée à la partie supérieure du ressort (fig. XXII-2). Les figures XXII-3 et XXII-4 montrent la mise en place de ressorts à

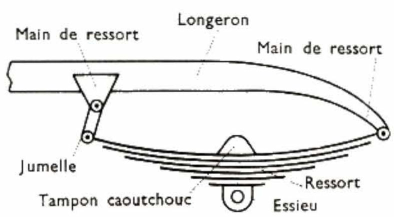


Fig. XXII-3

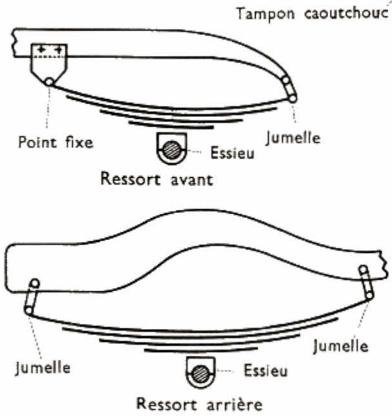


Fig. XXII-4

lames droits. Les jumelles — une ou deux — permettent des variations de distance entre les deux « œils » de la lame maîtresse, de même que des axes de rotation du type silentbloc (V. fig. XXII-15). Les jumelles liées à une main de ressort ou à un essieu peuvent subir ainsi des déplacements limités.

Il est dit *cantilever* dans le cas contraire; la lame principale est placée au bas du ressort. Il peut être aussi *semi-cantilever* (fig. XXII-5 et XXII-6).

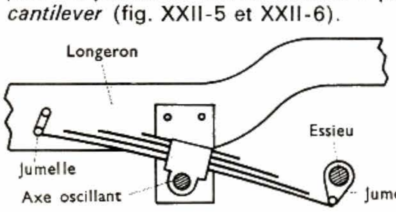


Fig. XXII-5
Ressort cantilever

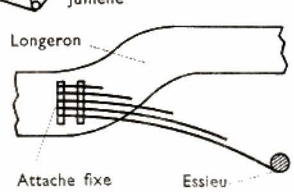


Fig. XXII-6
Ressort semi-cantilever

Les caractéristiques de ce type de ressorts, qu'il s'agisse des caractéristiques géométriques ou de la flexibilité pour une variation de charge déterminée sont rappelées ci-après.

La *longueur du ressort* est la longueur de la lame maîtresse. La lame suivante a généralement la même longueur.

La *largeur* des lames et leur *épaisseur* de même que le *nombre* des lames superposées doivent être indiqués.

La *flèche minimale*, dans le cas d'un ressort droit, est la flèche du ressort à l'état libre, c'est-à-dire non chargé.

La *flèche maximale* normale correspond au cas où le ressort supporte un véhicule chargé de la masse maximale autorisée.

Le *débattement normal* correspond à la différence entre ces deux flèches. Le débattement maximal correspond au cas où se produit un talonnement de l'essieu que supporte le ressort.

La *flexibilité* est caractérisée par la variation de la flèche sous l'action d'une charge déterminée. Pour simplifier, on définit cette variation pour une charge de 100 kg et l'on admet qu'elle est la même toute les fois qu'une charge quelconque augmente de 100 kg, ce qui n'est pas rigoureusement exact.

La fabrication des ressorts à lames est simple. Cependant ils présentent certains inconvénients: d'une part, les lames superposées fournissent une grande surface de frottement difficile à lubrifier, d'autre part, leur masse relativement grande est constante alors que les charges variables peuvent souvent ne pas nécessiter un ressort aussi important.

Ces ressorts, de moins en moins employés pour les voitures particulières sont encore couramment utilisés dans les suspensions arrière des poids lourds.

1.2. Ressorts hélicoïdaux ou à boudin. — Ces ressorts sont constitués par une barre d'acier de section relativement faible enroulée à chaud en hélice (fig. XXII-7).

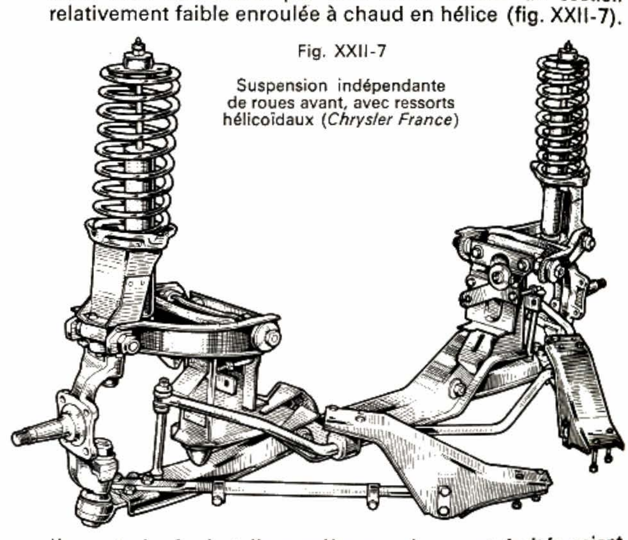


Fig. XXII-7

Suspension indépendante de roues avant, avec ressorts hélicoïdaux (*Chrysler France*)

Ils sont placés de telle manière que leurs extrémités soient solidaires l'une du châssis et l'autre de l'essieu ou d'un bras de liaison; mais ces ressorts ne peuvent assurer que difficilement des liaisons longitudinales ou transversales directement châssis-essieu. Leurs avantages sont évidents: encombrement réduit, masse relativement faible, construction facile, entretien très limité. Ils sont utilisés dans la construction de nombreuses voitures particulières et dans le cas, de plus en plus fréquent, des roues indépendantes.

Leurs caractéristiques essentielles sont:

— le diamètre de la section du fil et le diamètre d'enroulement,

— la hauteur du ressort libre (non chargé),

— la flexibilité caractérisée par la variation de la hauteur considérée dans les mêmes conditions que pour les ressorts à lames.

— la hauteur minimale qui correspond à la flexibilité maximale.

1.3. Ressorts à barre de torsion. — Ils se présentent sous la forme d'une barre d'acier cylindrique reliée, d'une

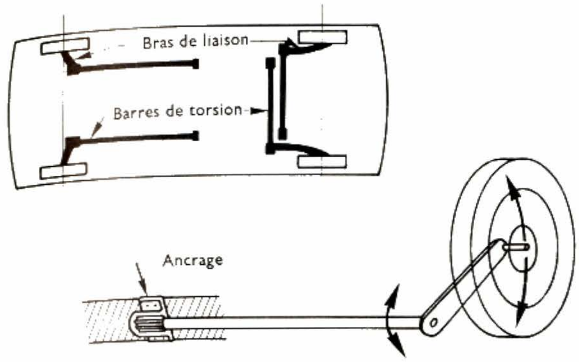


Fig. XXII-8 — Suspension à barres de torsion et son fonctionnement

part, au châssis par un ancrage et, d'autre part, à la roue par un bras articulé. Les oscillations verticales de la roue entraînent une torsion de la barre qui subit une déformation élastique et revient ensuite à sa position initiale (fig. XXII-8).

Les conditions de travail d'une barre de torsion exigent que cette pièce soit faite d'un acier de qualité et correctement usinée. Sa rupture peut avoir de graves conséquences pour la partie voisine de la suspension. Cependant, ses avantages ne sont pas négligeables. Ces ressorts sont peu encombrants et leur forme simple permet de les placer facilement. Le réglage de la hauteur du véhicule pour chacune des roues est facilité. La masse du ressort est faible pour une charge déterminée et son entretien est simple.

1.4. Ressorts en caoutchouc. — Ces ressorts sont parfois utilisés directement. Le plus souvent, ils sont associés à des ressorts d'acier de types courants de manière à assouplir les suspensions. Le caoutchouc présente l'avantage de pouvoir travailler à la traction ou à la pression et de subir des efforts de torsion.

2. FLEXIBILITÉ

Les notions de flexibilité variable et double flexibilité se rattachent au comportement général de la suspension. Lorsqu'elle intervient, toute charge d'un véhicule entraîne des oscillations des ressorts dont la période dépend en particulier de leur flexibilité. Ces oscillations peuvent incommoder les passagers qui sont déplacés verticalement vers le haut et vers le bas dans le cas le plus simple.

Les charges imposées au même véhicule sont évidemment variables. Le nombre des passagers et l'importance des masses transportées entraînent, pour la suspension en général et les ressorts en particulier, des conditions de fonctionnement différentes. Le véhicule doit être adapté à celles-ci et, dans tous les cas, l'on cherche à réduire la gêne provoquée par les oscillations.

Des ressorts prévus pour des charges lourdes accroîtront la dureté des sièges; au contraire, s'ils sont prévus seulement pour supporter des charges légères, le premier inconvénient sera de donner lieu à des oscillations excessives. Mais les véhicules supportant généralement des charges variables, il faut tenir compte de cette exigence.

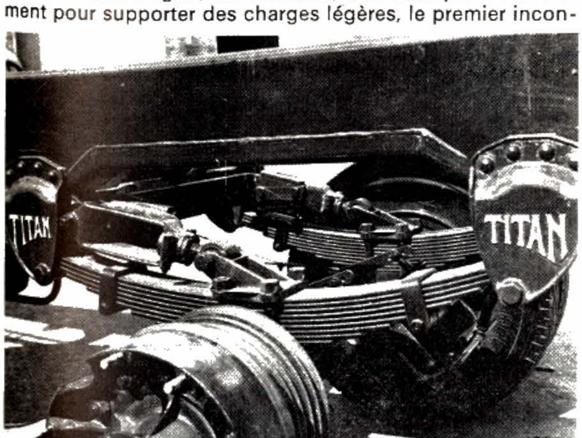


Fig. XXII-9 — Suspension à flexibilité variable sur une remorque. Les tirants auxiliaires qui joignent les milieux des ressorts au châssis diminuent la flexibilité quand la lame maîtresse tend à s'allonger (*Titan*)

2.1. Flexibilité variable. — Un dispositif complémentaire réduit les périodes d'oscillations (fig. XXII-9). Des tirants liés au châssis par le milieu des lames de ressorts diminuent la flexibilité des lames lorsque la charge augmente.

2.2. Double flexibilité. — Deux ressorts intervenant successivement sont mis en place, l'un pour les charges légères, et l'autre qui ajoute son action à celle du premier lorsque la charge totale augmente.

3. LIAISONS ROUE-CHÂSSIS

3.1. Essieu rigide. — Ce système n'existe pratiquement plus à l'avant sauf s'il s'agit de véhicules hippomobiles. Il tend à disparaître pour l'essieu arrière. Seuls des poids lourds utilisent encore des essieux rigides à l'arrière.

Le rappel de l'existence de ce type d'essieu ne présente d'intérêt que pour évoquer les risques de déséquilibre qu'il peut faire courir au véhicule (fig. XXII-10).

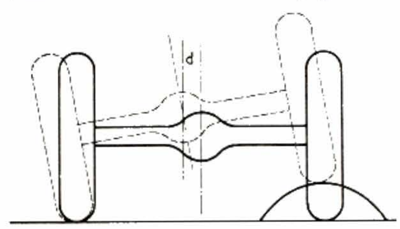


Fig. XXII-10

Essieu rigide

3.2. Roues indépendantes. — Ce système, utilisé d'abord pour les roues avant, se généralise. De nombreux types existent. Son principe conduit à limiter l'emploi de l'intermédiaire de l'essieu pour assurer la liaison roue-châssis que l'on réalise directement. Chacune des roues peut se déplacer sans entraîner nécessairement le déplacement de l'autre. Les deux roues peuvent en particulier subir des oscillations très différentes.

4. SYSTÈMES DE SUSPENSION

Avec l'essieu rigide un système simple consiste à relier l'essieu au châssis par des ressorts à lames voisins des roues. Cependant, nous sommes conduit à étudier surtout les roues indépendantes et ce sont les systèmes de suspension qui les concernent que nous devrons examiner.

4.1. Suspension du type mécanique

— *Système à parallélogramme transversal.* — Deux bras parallèles d'égale longueur relient la roue au châssis. Le montage nécessite une barre de torsion ou des ressorts à lames. Le carrossage reste constant mais la voie peut varier (fig. XXII-11).

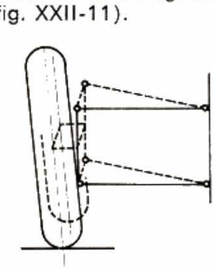


Fig. XXII-11 — Parallélogramme transversal

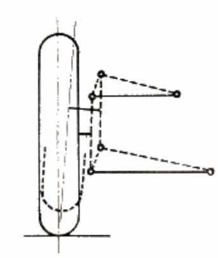


Fig. XXII-12 — Quadrilatère transversal

— *Système à parallélogramme longitudinal.* — Des bras sont disposés parallèlement au châssis. La voie et le carrossage sont constants.

— *Système à quadrilatère transversal ou bras transversaux inégaux* (fig. XXII-12). — Il nécessite des ressorts hélicoïdaux ou des barres de torsion. Le carrossage est variable; la voie peut être maintenue constante si points d'articulation et longueur sont convenablement choisis.

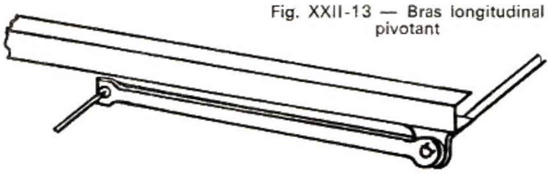


Fig. XXII-13 — Bras longitudinal pivotant

— *Système à bras longitudinal pivotant* (fig. XXII-13). — Voie et carrossage sont alors variables.

— *Système coulissant.* — Un tube vertical contient un ressort hélicoïdal et sur les roues avant il devient l'axe de pivotement de la fusée. Carrossage et voie peuvent être maintenus constants.

— *Système à demi-essieu.* — Pour roues arrière motrices, il est articulé au centre du châssis. Voie et carrossage peuvent varier, sauf dans le cas décrit ci-après.

— *Système de Dion pour roues arrière motrices.* — Ce système convient aux roues arrière indépendantes et présente divers avantages. Le différentiel est relié au châssis et des demi-arbres relient le différentiel aux roues, l'importance de la partie non suspendue se trouve ainsi réduite et la liaison différentiel-roues est réalisée de telle manière que voie et carrossage peuvent rester constants (fig. XXII-14).

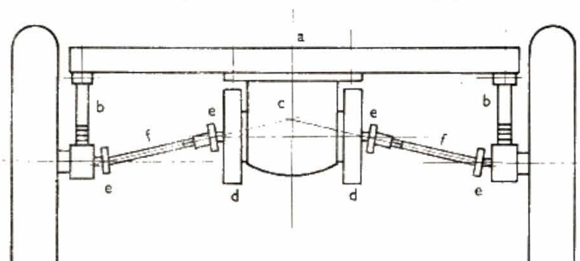


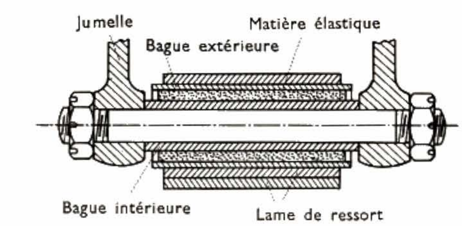
Fig. XXII-14 — Essieu de Dion. Voie et carrossage constants

a) Cadre
b) Suspension
c) Carter du différentiel
d) Tambours de frein
e) Cardans
f) Demi-arbres moteurs

— *Articulations des suspensions.* — Les articulations subissent des efforts relativement importants à l'occasion des oscillations de l'ensemble de la suspension. Les pièces métalliques, axes et coussinets, qui les constituent, sont souvent complétés par des dispositifs dénommés *silentblocs:* un tube de caoutchouc d'épaisseur convenable est placé entre deux tubes métalliques; l'épaisseur de caoutchouc dépend naturellement des diamètres des tubes (fig. XXII-15).

Fig. XXII-15

Silentbloc



Les silentblocs qui améliorent la souplesse des articulations réduisent aussi les bruits résultant habituellement du contact des pièces métalliques. Le caoutchouc présente l'inconvénient de se détériorer facilement s'il n'est pas à l'abri des projections d'huile et de carburant. Il convient de remplacer périodiquement les silentblocs. On évite ainsi leur durcissement ou leur désagrégation et la réapparition, accentuée parfois, des bruits qu'ils doivent éliminer et de chocs qui peuvent avoir des conséquences graves.

— *Stabilisateurs.* — Si la suspension doit surtout réduire les effets des oscillations verticales, il n'en existe pas moins des actions longitudinales ou transversales auxquelles ses éléments doivent s'opposer. Les phénomènes de roulis et de tangage et l'action de la force d'inertie centrifuge dans les virages doivent être atténués au moyen de barres antiroulis, de certaines barres longitudinales et, particulièrement, du stabilisateur transversal; une barre transversale dont les supports sont reliés au châssis relie deux leviers solidaires de l'essieu.

Le stabilisateur ainsi décrit s'oppose à l'inclinaison du véhicule dans les virages et évite, dans une certaine mesure, le supplément de charge que la force d'inertie centrifuge tend à apporter aux ressorts extérieurs.

4.2. Suspensions pneumatiques ou oléopneumatiques. — Le principe général de ces systèmes revient à faire reposer les charges essentielles (supportées finalement par chaque roue) par un matelas d'air intermédiaire, de volume et de pression variables. En raison de la souplesse qui en résulte et du caractère simple de ce principe, il est certain que les systèmes correspondants se développeront de plus en plus, bien que peu de constructeurs les aient encore adoptés, en raison des difficultés de réalisation.

— *Suspension pneumatique.* — De nombreux véhicules comportent un compresseur d'air susceptible d'alimenter un cylindre contenant l'air comprimé, qui, par l'intermédiaire d'un soufflet, réagit lorsqu'une charge apparaît. La disparition de la charge entraîne l'évacuation de l'air.

— *Suspension hydro ou oléopneumatique.* — La pression est transmise au gaz par un liquide séparé du gaz par une membrane. Le liquide est poussé par un piston lorsqu'une charge nouvelle agit sur la suspension.

Il existe déjà de nombreux types de telles suspensions et l'on décrira sommairement les types de suspensions adoptées pour divers véhicules au paragraphe 6.

5. AMORTISSEURS

L'emploi des amortisseurs s'explique par la flexibilité des suspensions (V. § 2), à ressorts ou pneumatiques. Parfois, se produisent des rebondissements désagréables à la suite de fléchissements trop marqués des suspensions.

L'amortisseur est fixé au châssis, d'une part, et au support d'une roue, d'autre part. Il est dit télescopique en raison du déplacement du piston dans les deux sens à travers le cylindre, suivant qu'il s'agit de freiner un mouvement descendant ou ascendant d'un ressort (fig. XXII-16).

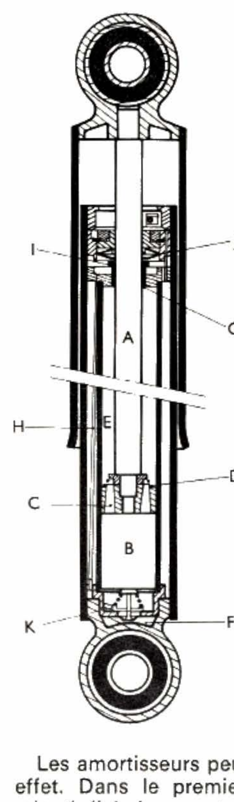


Fig. XXII-16

Amortisseur hydraulique télescopique

A) Tige du piston
B) Chambre d'huile
C) Piston perforé
D) Soupape du piston
E) Chambre de compression
F) Chambre de réserve d'huile
G) Bague d'étanchéité
H) Canal de retour d'huile
I) Arrêt de la bague d'étanchéité
J) Rondelles élastiques
K) Base d'appui du ressort de soupape

Les amortisseurs peuvent être à simple effet ou à double effet. Dans le premier cas, ils n'interviennent que pour ralentir l'abaissement de la suspension. S'ils sont à double effet, ils réduisent à la fois la compression des ressorts, par exemple, et la détente qui se produit aussitôt après compression dans tous les systèmes de suspension.

Ils peuvent être hydrauliques ou à friction. Les amortisseurs employés le plus souvent sont du type hydraulique,

dit télescopique. Un tel amortisseur comprend un cylindre et un piston dont la tige est reliée à un bras lié lui-même à la roue. Lorsque le châssis et éventuellement la roue s'affaissent, le piston force l'huile du cylindre et soulève un clapet réglé pour freiner modérément le mouvement de la suspension. Lorsque le ressort se détend, l'huile passe par un clapet réglé en vue d'un freinage plus énergique qui atténue les oscillations du ressort.

6. SIÈGES ET PNEUMATIQUES

Les **sièges** sont liés surtout à la carrosserie et, en ce qui concerne la suspension, leur action est essentiellement locale ; ils peuvent ajouter au confort si les autres éléments remplissent convenablement leur rôle.

Les **pneumatiques** (V. t. 4, La route, chap. 19) rendent la suspension plus souple lorsqu'ils peuvent être gonflés à basse pression, mais leur pression doit être, pour la plupart des voitures, plus forte à l'arrière qu'à l'avant.

7. ÉTUDE DE QUELQUES TYPES DE SUSPENSION

Avant d'étudier d'une façon plus complète quelques dispositifs particuliers, citons les types de suspension utilisés sur divers véhicules en circulation actuellement et de construction relativement récente, française et étrangère.

Citroën SM. — Suspension hydropneumatique ; correcteur d'assiette avant et arrière.

Citroën GS. — Suspension hydropneumatique ; bloc hydraulique de suspension avec amortisseur intégré et correcteur d'assiette. Dans les deux cas évidemment (SM et GS) les quatre roues sont indépendantes.

Ces types de suspension s'appliquent, à quelques détails près, aux différentes DS (V. § 7.2).

Datsun. — Type japonais un peu plus ancien. Suspension avant Mac Pherson avec ressorts hélicoïdaux et stabilisateurs de dévers. Suspension arrière avec bras triangulaires obliques sur roues indépendantes et ressorts hélicoïdaux.

Fiat 124 Sport 1600. — Exemple de suspension mécanique un peu dure : leviers triangulaires, ressorts hélicoïdaux à l'avant. À l'arrière, essieux rigides avec ressorts hélicoïdaux, amortisseurs télescopiques et jambes de poussée longitudinales et de réaction.

Mercedes-Benz 280 SE automatique. — À l'avant, roues indépendantes, suspension mécanique avec ressorts hélicoïdaux et stabilisateur transversal. À l'arrière, amortisseurs télescopiques, roues indépendantes avec essieu brisé à pivot unique, ressorts hélicoïdaux avec éléments compensateurs en caoutchouc et ressorts compensateurs hydropneumatiques avec régulateur de niveau.

Opel Commodore GS/E. — Suspension avant de type mécanique avec double bras de longueur inégale, ressorts hélicoïdaux, amortisseur télescopique, barre stabilisatrice. Suspension arrière de type mécanique, avec pont rigide, stabilisateur de déport, poussée et réaction par leviers longitudinaux, ressorts hélicoïdaux, stabilisateurs antiroulis.

Ford Capri 2300 GT. — Suspension avant Mac Pherson, ressorts hélicoïdaux, stabilisateurs anti-roulis, amortisseurs télescopiques incorporés. Suspension arrière : pont rigide ressorts semi-elliptiques, bielles et réaction, amortisseurs télescopiques.

Renault 16 AL (1600). — Suspensions avant et arrière : roues indépendantes, barres de torsion avec amortisseurs hydrauliques télescopiques et barre antiroulis. À l'avant, quadrilatères déformables transversaux. À l'arrière, bras de suspension tirés.

Peugeot 504 coupé. — Suspension avant Mac Pherson ; ressorts hélicoïdaux, stabilisateurs de dévers, amortisseurs télescopiques hydrauliques. Suspension arrière : roues indépendantes semi-tirées, ressorts hélicoïdaux et les autres éléments comme à l'avant.

Caractéristiques particulières :

BMW 2800. — Suspension mécanique à jambes élastiques avec ressorts hélicoïdaux. Un réglage de niveau hydraulique est prévu à l'arrière et des ressorts de compensation en caoutchouc existent à l'avant.

Suspensions Chrysler 180. — La figure XXII-17 met en évidence :

— sur la suspension avant du type Mac Pherson, les

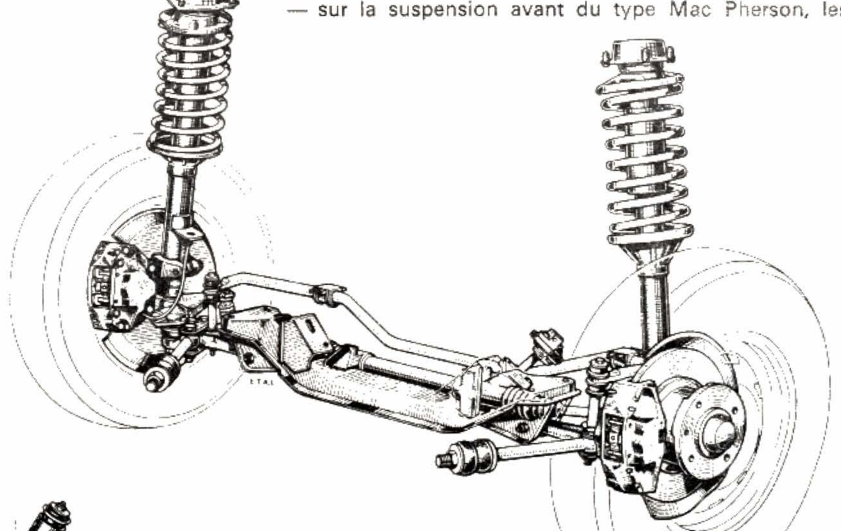
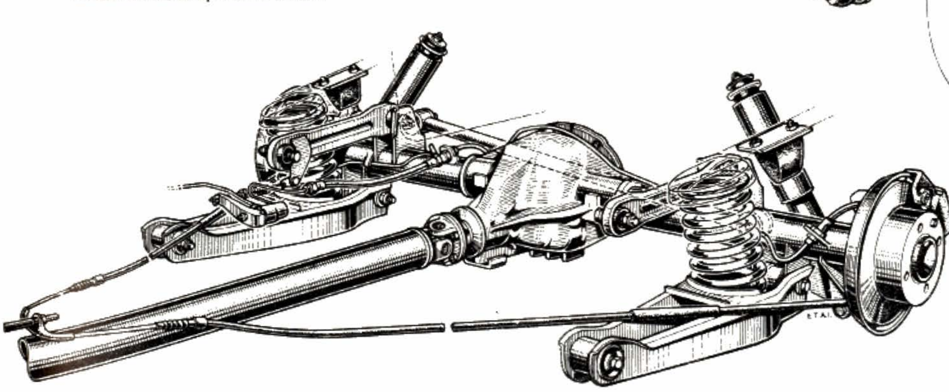


Fig. XXII-17

Ensemble de suspension avant



Ensemble de suspension arrière

ressorts hélicoïdaux, la barre stabilisatrice et les amortisseurs hydrauliques qui sont à double effet ;

— sur la suspension arrière un pont banjo et les ressorts hélicoïdaux, les bras longitudinaux, de même que les amortisseurs hydrauliques à double effet.

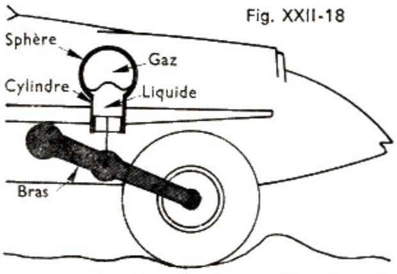
De cette étude rapide sur des véhicules de constructions variées, il résulte que les suspensions des véhicules mentionnés sont souvent du type que nous avons qualifié de mécanique. Citroën surtout et parfois Mercedes installent des systèmes hydropneumatiques ou oléopneumatiques.

Les ressorts hélicoïdaux sont les plus employés. Les amortisseurs télescopiques hydrauliques sont de plus en plus adoptés.

7.1. Correcteur d'assiette. — L'introduction de cet important dispositif est facilitée pour les suspensions pneumatiques (hydropneumatiques ou oléopneumatiques). Sur les quelques véhicules dont les suspensions sont sommairement décrites ci-dessus, seuls Mercedes et surtout Citroën en font état. Ce constructeur a particulièrement poussé l'application du système le plus intéressant, à divers titres, des suspensions présentées pendant ces dernières années.

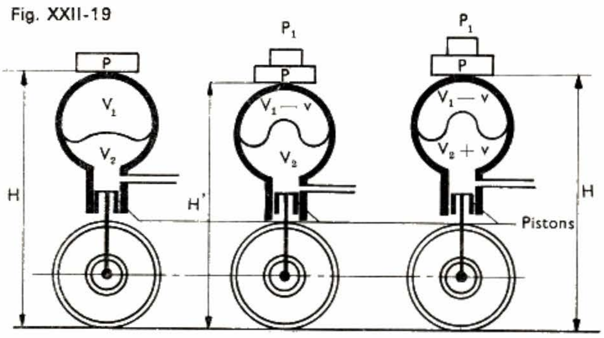
7.2. Étude de la suspension Citroën hydropneumatique. — Chaque roue indépendante est reliée à la caisse par un bras solidaire d'un piston coulissant dans un cylindre. Le piston agit sur un liquide qui peut comprimer un gaz contenu dans une sphère (fig. XXII-18). La roue

Fig. XXII-18



est soumise à une charge P qui, agissant sur la sphère, conduit à un état d'équilibre correspondant au volume V_1 pour le gaz et V_2 pour le liquide. L'action d'une charge supplémentaire P_1 réduit tout d'abord le volume du gaz et la hauteur de la partie supérieure de la sphère. Les volumes sont alors $V_1 - v$ pour le gaz et demeure V_2 pour le liquide, l'action du correcteur d'assiette porte le volume liquide à $V_2 + v$ et le volume total $V_1 + V_2$ ramène la suspension à sa position initiale. Le liquide comprime plus ou moins le gaz qui joue ainsi le rôle d'un ressort flexible (fig. XXII-19).

Fig. XXII-19



$V_t = V_1 + V_2$ $\quad V_t = (V_1 - v) + V_2$ $\quad V_t = (V_1 - v) + V_2 + v)$

— *Action du correcteur de hauteur.* — Une barre anti-roulis relie les bras de suspension avant ou arrière et commande un tiroir distributeur dit correcteur de hauteur qui établit la liaison soit avec un liquide haute pression, soit avec un réservoir à la pression normale (fig. XXII-20 a, b et c).

Les cylindres peuvent aussi demeurer isolés (position neutre).

— *La figure XXII-21 a et b* met en évidence le fonctionnement du distributeur et la disposition du gaz et du liquide dans la sphère dans les cas suivants : augmentation de la charge ; position stabilisée ; diminution de la charge ; position stabilisée.

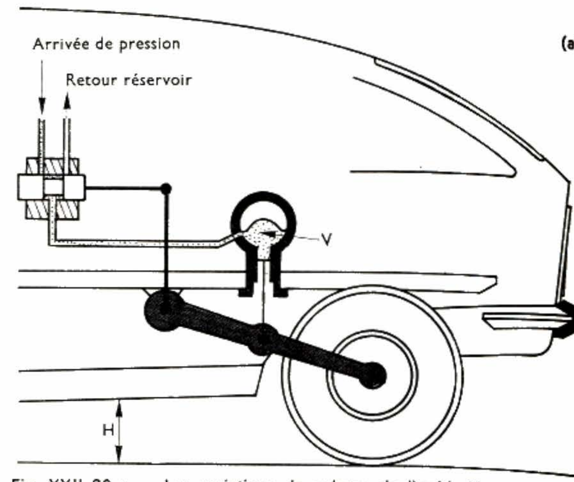


Fig. XXII-20 a — Les variations de volume de liquide V assurent une hauteur sol-caisse constante. ; l'affaissement de la caisse lorsque la charge (P) de la voiture augmente entraine une diminution en volume du gaz (v)

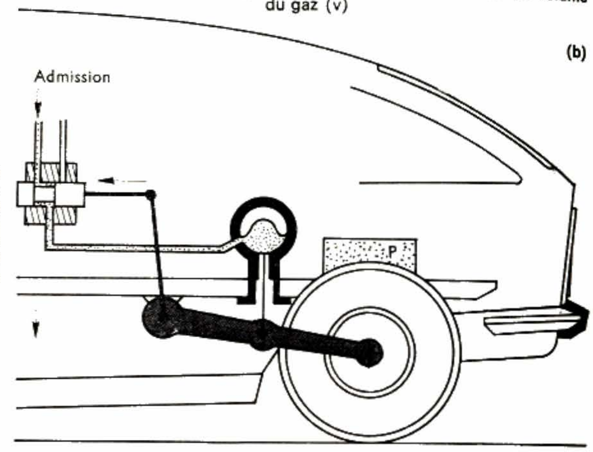


Fig. XXII-20 b — La barre anti-roulis assure le déplacement du tiroir du correcteur, d'où admission d'un volume de liquide égal à v, ce qui permet de rétablir la hauteur H

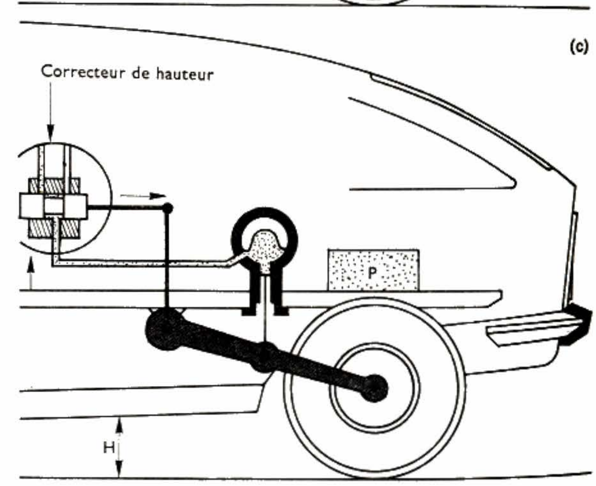


Fig. XXII-20 c — Par suite du nouveau changement de position de la caisse, la barre anti-roulis ramène le tiroir en position neutre

— *Circuit suspension* (fig. XXII-22). — Ce schéma montre le circuit des liquides haute pression, pression intermédiaire et pression atmosphérique considérés pour l'ensemble du véhicule.

Conclusion : Il est évident que la dynamique des véhicules, la direction et la suspension sont liées. En commandant les déplacements du véhicule, la direction met en jeu tous les éléments de la suspension et l'ensemble intervient dans la dynamique du véhicule (V. t. 4, La route, chap. 2).

La suspension doit pouvoir, par les éléments qui la composent, répondre correctement aux actions normales de la direction (V. t. 4, La route, chap. 21) et contribuer à assurer une tenue de route convenable.

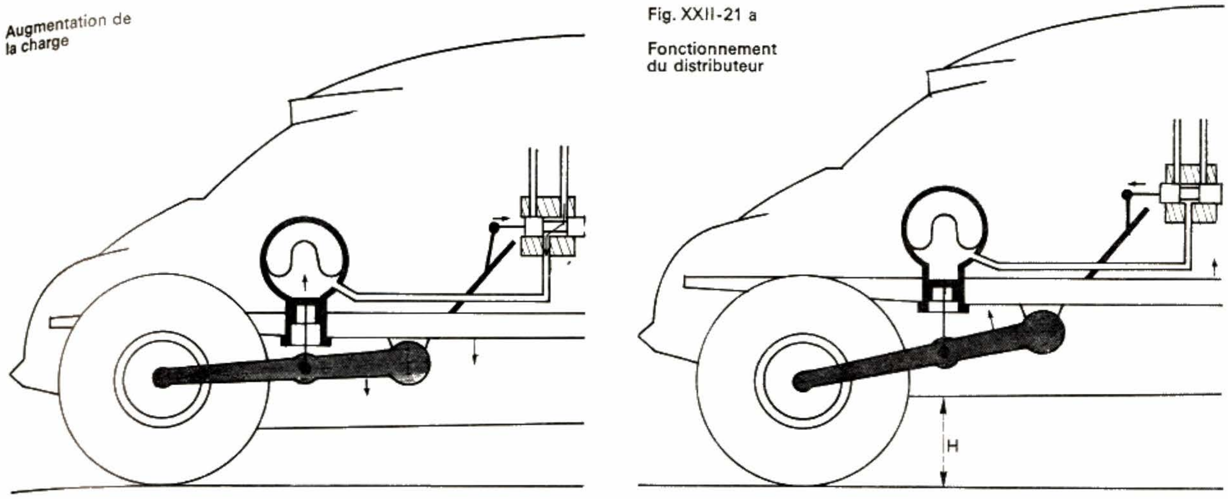


Fig. XXII-21 a

Fonctionnement du distributeur

L'action des barres anti-roulis solidaires des bras de suspension sur les tiges de commande des tiroirs distributeurs établit la liaison entre la source de liquide haute pression et les cylindres de suspension ; l'augmentation du volume de liquide dans les cylindres a pour conséquence la remontée de la caisse qui entraîne une nouvelle action des barres anti-roulis ainsi que des tiroirs distributeurs

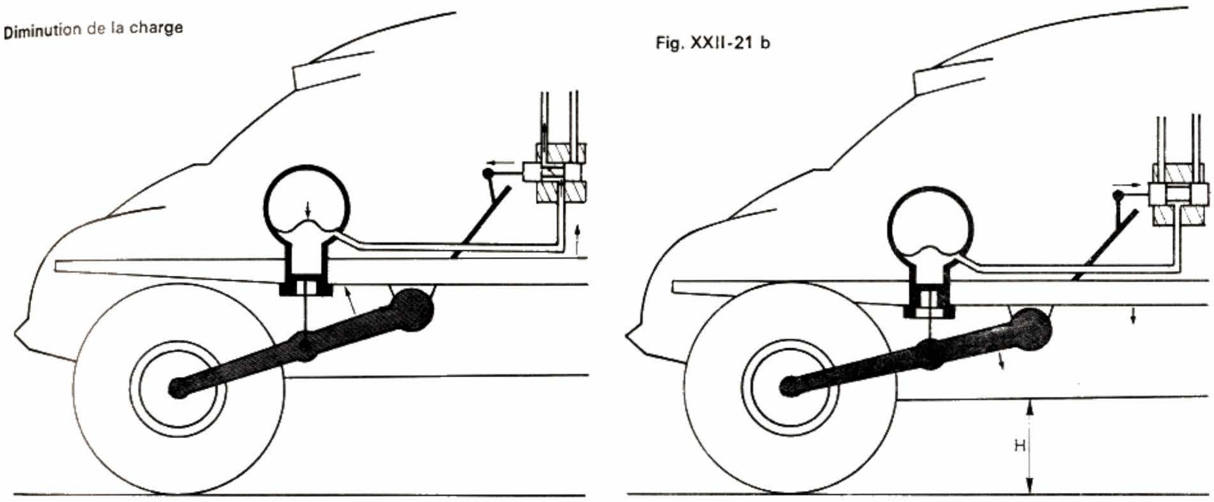


Fig. XXII-21 b

Quand la charge sur la voiture diminue, la caisse remonte avec les ensembles sphères-cylindres, les masses gazeuses s'étant détendues. L'action des barres anti-roulis place les tiroirs distributeurs en position retour. L'excédent de liquide retourne au réservoir jusqu'à ce que la voiture reprenne sa position initiale ; les tiroirs distributeurs sont replacés en position neutre

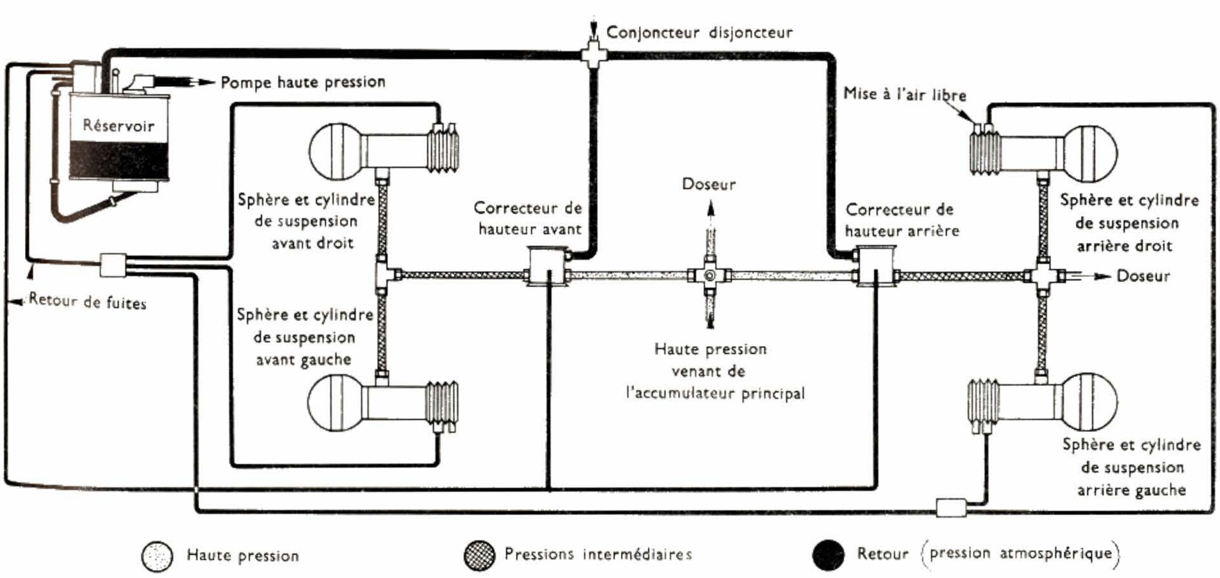


Fig. XXII-22 — Circuit suspension

CHAPITRE XXIII

INSTALLATION ÉLECTRIQUE

L'installation électrique devient de plus en plus importante, les accessoires rendant la conduite du véhicule plus sûre ou plus facile se multipliant sans cesse.

La source d'énergie est une batterie d'accumulateurs, maintenue constamment en charge par une dynamo ou un ensemble alternateur-redresseur. L'installation comporte différents circuits.

1. CIRCUIT D'ALLUMAGE

Ce circuit assure l'inflammation du mélange gazeux au moment précis prévu par le constructeur du moteur. Il peut être réalisé par des moyens différents.

1.1. Allumage par magnéto. — Il n'est pratiquement plus employé sur les voitures actuelles, à cause de son prix élevé et de son peu d'aptitude à donner des étincelles puissantes aux faibles vitesses de rotation du démarrage.

Un induit entraîné par le moteur tourne entre les pôles d'un ou plusieurs aimants. L'enroulement primaire de cet induit est en court-circuit et, *n* fois par tour, s'il y a *n* pôles, le courant qui le traverse passe par un maximum. Au moment où le courant passe par un maximum, une came, située en bout d'arbre, ouvre brusquement le circuit par l'intermédiaire d'un rupteur. La variation brusque du courant induit une tension très élevée dans un enroulement secondaire comprenant un grand nombre de tours de fil fin, bobiné comme le primaire sur l'induit. Cette tension peut être prélevée entre une bague tournante et la masse ; un seul balai frottant suffit donc. Un distributeur tournant en synchronisme avec le moteur permet de l'appliquer à la bougie convenable.

Un condensateur est placé aux bornes du rupteur, il protège les contacts du rupteur d'une érosion électrique trop rapide et renforce l'étincelle.

Comme avantages sur l'allumage par bobine, la magnéto possède de ne pas nécessiter de batterie d'accumulateurs et de donner, à l'inverse d'une bobine, des étincelles aux bougies de plus en plus énergiques à mesure que la vitesse de rotation du moteur croît.

1.2. Allumage par batterie. — Cet allumage est utilisé universellement sur les véhicules actuels. Il peut être à commande électrique ou à commande électronique. Le circuit d'allumage (fig. XXIII-1) fonctionne de la façon suivante : le rupteur de l'allumeur ayant son contact établi, le courant dans le primaire de la bobine tend vers sa valeur maximale. Au moment où la came de l'allumeur ouvre brusquement le rupteur contenu dans le circuit, ce courant décroît rapidement. Une grande énergie est alors brutalement dissipée entre les contacts de cet appareil (courant d'extra-rupture) et la rapide variation de courant primaire engendre, par induction dans le secondaire de la bobine, une impulsion de tension très élevée.

Cette haute tension est appliquée entre la masse et un doigt tournant placé dans la tête de l'allumeur, au moment où ce doigt se trouve juste en face et à très faible distance d'un plot métallique réuni par un câble à fort isolement à une bougie.

L'étincelle jaillit alors en deux endroits : entre le doigt tournant et le plot qui lui fait face, et entre les électrodes de la bougie du cylindre où le mélange gazeux est au maximum de compression, le piston étant à ce moment en haut de sa course.

Le circuit d'allumage comporte plusieurs organes.

1.2.1. La batterie d'accumulateurs. — Cette source d'énergie est presque toujours un accumulateur au plomb, choisi pour son aptitude à fournir des courants importants et pour son prix moins élevé que celui des autres types d'accumulateurs. La tension de 6 volts est abandonnée au profit de celle de 12 volts de plus en plus fréquente. Les poids lourds sont souvent équipés de batteries de 24, 36 ou 48 volts.

Pour la clarté du schéma, on a séparé le rupteur R et la came C du disrupteur tournant D ; mais la came C et le doigt tournant sont solidaires du même axe et quand le contact R s'ouvre, le disrupteur est juste en face d'un des plots Q du distributeur.

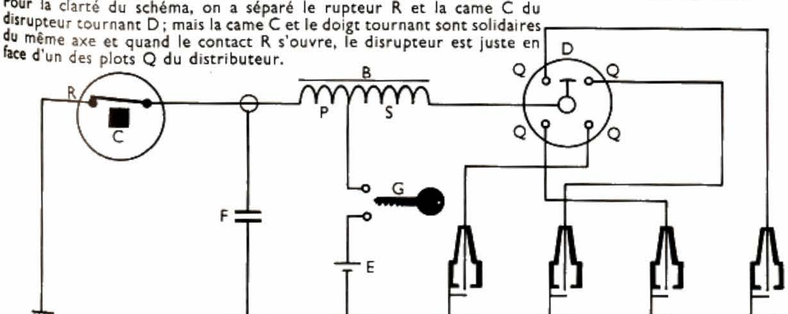


Fig. XXIII-1

Schéma d'un allumage par batterie

B : bobine
C : came
D : disrupteur
E : batterie
F : condensateur
G : contact à clef
K : bougies
P : primaire
Q : plots de distributeur
R : rupteur
S : secondaire

1.2.2. La bobine. — C'est un autotransformateur dont le circuit magnétique n'est pas complètement fermé sur lui-même (fig. XXIII-2). Il comporte un enroulement primaire d'une centaine de tours de fil de cuivre émaillé d'un diamètre compris entre 0,4 et 1 mm, et un enroulement secondaire de 18 000 à 25 000 tours de fil de cuivre émaillé d'un diamètre de 0,07 à 0,09 mm suivant les constructeurs.

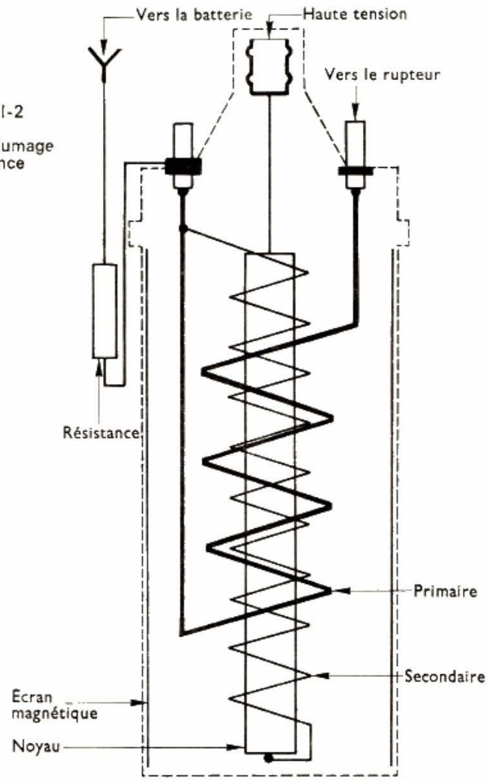


Fig. XXIII-2
Bobine d'allumage à résistance

Cet enroulement secondaire comporte un grand nombre de couches de fil isolées entre elles par une couche de papier spécial. Il délivre des tensions dont la valeur de crête peut atteindre 20 000 V. Pour assurer son refroidissement, l'enroulement primaire est bobiné par-dessus le secondaire et se trouve placé vers l'extérieur de la bobine. La fin de l'enroulement secondaire est raccordée au début de l'enroulement primaire ; ce point commun des deux enroulements est relié à la borne « batterie » de la bobine. La fin de l'enroulement primaire est réunie à la borne allant vers le rupteur. Le début du secondaire est relié à la borne centrale à haut isolement par laquelle la haute tension est appliquée à l'allumeur.

Le circuit magnétique est formé d'un noyau de tôles au silicium placé au centre des enroulements, et d'un écran de même qualité magnétique entourant extérieurement les bobinages. Le noyau central est relié au début de l'enroulement secondaire et se trouve ainsi placé sous la haute tension. Pour cette raison, il est séparé du boîtier par un support isolant vers le fond et par la tête isolante de la bobine vers le haut.

L'ensemble de la bobine ainsi constitué est placé dans un boîtier généralement métallique (acier ou aluminium), plus rarement dans un boîtier en matière plastique ou en verre. La tête isolante est sertie sur le boîtier, et le sertissage comprend un joint d'étanchéité.

Les enroulements baignent dans une huile à haut pouvoir isolant qui, suivant les constructeurs, est introduite avant ou après le sertissage du boîtier et de la tête. Il est nécessaire de laisser un peu d'air dans le boîtier rendu étanche car, lors du fonctionnement, la bobine s'échauffe, l'huile se dilate et, s'il n'y avait pas un certain volume d'air pouvant se comprimer, la bobine éclaterait.

Sur certaines bobines l'huile est remplacée par un compound à base de brai, mais la sécurité n'est pas aussi bonne qu'avec l'huile.

Certaines bobines possèdent une résistance mise en série avec l'enroulement primaire. Cette résistance a pour but de réduire la constante de temps du circuit primaire et par là d'améliorer le rendement de la bobine aux grandes vitesses de rotation du moteur (rappelons que la constante de temps d'un circuit est égale au rapport $\frac{L}{R}$ de l'inductance L du circuit et de sa résistance R ; V. t. 1, Électricité, chap. 26).

De plus, une bride est serrée autour de la bobine et porte deux pattes normalisées pour la fixation.

Depuis quelque temps, un type de bobine sans boîtier ni huile, ressemblant à un transformateur classique rectangulaire apparaît sur le marché de l'automobile.

1.2.3. L'allumeur. — Cet organe mécanique est en fait un interrupteur tournant chargé d'assurer de nombreuses fonctions (fig. XXIII-3). Il comporte :

a) *Un carter métallique* qui supporte les différents organes et possède un ou deux paliers traversés par l'arbre d'entraînement. Côté moteur, il est terminé par une pièce s'emboîtant (avec repérage) dans une pièce du moteur ; elle permet de l'entraîner à une vitesse égale à la moitié de celle du moteur.

b) *Une came* qui porte en principe autant de saillies appelées bossages que le moteur compte de cylindres. Cependant, pour les moteurs à 6 ou 8 cylindres, on utilise plutôt des cames à 3 ou 4 bossages, et dans ce cas, il y a deux rupteurs commandant chacun une bobine séparée. Cette came est montée en roue libre sur l'extrémité de l'arbre entraîneur, cela pour qu'elle puisse se déplacer autour de ce dernier afin d'obtenir l'avance à l'allumage.

c) *Un système d'avance centrifuge.* L'inflammation totale des gaz dans un cylindre n'est pas instantanée. Au fur et à mesure d'une accélération, il devient nécessaire de faire jaillir l'étincelle de plus en plus tôt avant que le piston ait atteint le point mort haut, pour donner au mélange air-essence le temps de s'enflammer. Nous avons vu que l'arbre d'entraînement tournait deux fois moins vite que le

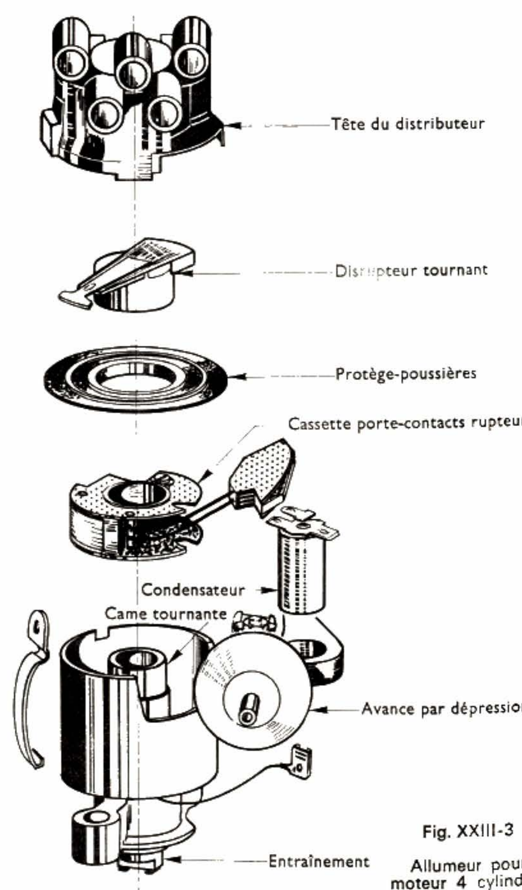


Fig. XXIII-3
Allumeur pour moteur 4 cylindres (*S.E.V. Marchal*)

moteur mais en synchronisme avec lui. Si la came était fixée rigidement sur l'arbre, il n'y aurait pas d'avance possible.

La came peut tourner librement autour de l'axe et porte à sa base une barre transversale munie de deux petits axes sur lesquels peuvent tourner deux galets. Sur la barre transversale sont attachés, à chaque extrémité, deux ressorts fixés par ailleurs sur des crochets faisant corps avec un plateau tournant en même temps que l'arbre d'entraînement.

Ce plateau tournant porte aussi deux axes diamétralement opposés sur lesquels deux masselottes peuvent pivoter. À l'arrêt, ou aux faibles vitesses de rotation, les ressorts viennent appuyer les galets de la came sur les masselottes du plateau. Il n'y a pas d'avance et la came se comporte comme si elle était solidaire de l'arbre. Lorsque la vitesse de rotation croît, les masselottes s'écartent par inertie centrifuge et par leur forme elles viennent appuyer sur les galets, tendant les ressorts et obligeant la came à se déplacer en avant sur l'arbre. Si la vitesse décroît, les ressorts ramènent la came en arrière.

d) *Un interrupteur.* — Appelé plus communément rupteur il sert à ouvrir et fermer le circuit primaire de la bobine. Il est monté de telle sorte que, chaque fois qu'un bossage de la came soulève une pièce isolante fixée sur lui, il coupe son contact, et, comme nous l'avons vu précédemment, par l'intermédiaire de la bobine une étincelle jaillit à la bougie.

e) *Une avance par dépression.* — Son action s'ajoute à celle de l'avance centrifuge. Une petite chambre circulaire, fixée sur le côté de l'allumeur, comporte une membrane souple en toile caoutchoutée. Une tige placée en son centre est fixée à son autre extrémité sur la pièce supportant le contact du rupteur ; celle-ci peut tourner librement autour de l'arbre de l'allumeur. La chambre contenant la membrane est étanche et est reliée par une tubulure à un orifice du carburateur situé généralement sous le papillon d'admission d'air. Au ralenti la dépression est faible et n'agit pratiquement pas. Il en est de même lorsque le papillon est largement ouvert à pleine puissance, l'air entrant librement dans le carburateur. Au contraire, lorsque la voiture est lancée et que le moteur a un régime élevé, si le conducteur relève la pédale d'accélérateur et ferme le papillon, la dépression devient très forte et la membrane tire sur la tige, entraînant l'ensemble des contacts du rupteur en augmentant l'avance. Cela assure une meilleure combustion du mélange plus pauvre à ce moment-là et peut être considéré comme antipolluant et économiseur de carburant. Lors de la traction sur la tige, un ressort est comprimé ; il ramène les contacts en place lorsque le conducteur exécute une reprise.

f) *Un condensateur.* — Il a pour mission d'absorber l'étincelle de rupture qui se produit à chaque ouverture du rupteur, par électroérosion. Sans cette précaution les contacts de ce dernier seraient rapidement détruits. Ce condensateur joue aussi son rôle dans le circuit oscillant série formée par lui-même et par l'inductance des enroulements de la bobine au moment où jaillit l'étincelle à la bougie.

C'est en général un condensateur isolé au papier, imprégné d'huile ou d'une cire isolante et monté dans un boîtier métallique serti. Il est le plus souvent fixé par une patte sur le corps même de l'allumeur. Sa capacité est généralement comprise entre 220 et 330 10^{-9} F (0,22 à 0,33 μF).

g) *Un distributeur.* — Dans le cas d'un moteur à quatre cylindres par exemple, il ne suffit pas de provoquer à chaque tour de l'allumeur, quatre impulsions de haute tension dans la bobine ; encore faut-il appliquer cette haute tension à la bougie convenable, c'est-à-dire celle fixée au cylindre en compression à ce moment-là. C'est le rôle du distributeur. Il est composé de deux pièces : l'une tournante à haut isolement, fixée sur l'extrémité de la came et entraînée par elle, l'autre fixe, coiffe isolante qui recouvre l'allumeur et qui porte en son centre une électrode conduisant l'impulsion de tension de la bobine vers une pièce tournante, appelée disrupteur. Cette coiffe isolante porte sur sa périphérie autant d'électrodes que le moteur comporte de cylindres.

Le disrupteur porte un ergot pour qu'on ne puisse le placer que dans une seule position par rapport à la came, cela pour que son extrémité tournante se trouve toujours en face du plot correspondant à la bougie convenable au moment où la haute tension apparaît. Il n'y a pas de contact entre le rupteur tournant et les plots fixes : la petite distance qui est ménagée est aisément franchie par l'impulsion de tension en produisant une étincelle. Cette coupure est favorable à l'allumage : elle provoque une forte ionisation entre les électrodes de la bougie et facilite le jaillissement de l'étincelle.

Dans le cas de moteurs à six ou huit cylindres utilisant deux bobines, le disrupteur est double, et il y a deux arrivées haute tension sur la coiffe isolante.

1.2.4. Les bougies. — Ce sont des éclateurs (un par cylindre) qui donnent, au moment voulu, une étincelle enflammant le mélange air-essence comprimé par le piston dans le cylindre. Elles doivent posséder de grandes qualités souvent contradictoires : être d'excellents isolants électriques à haute température et être, en même temps, de bons conducteurs de la chaleur pour refroidir les électrodes. Elles doivent aussi résister aux pressions élevées produites lors de l'inflammation des gaz.

Elles sont constituées par un corps en stéatite (variété de porcelaine) traversée dans sa longueur par une électrode centrale qui fait plus ou moins saillie du côté intérieur au cylindre (fig. XXIII-4 a et b). L'extrémité de l'électrode est formée d'un métal résistant bien aux températures élevées

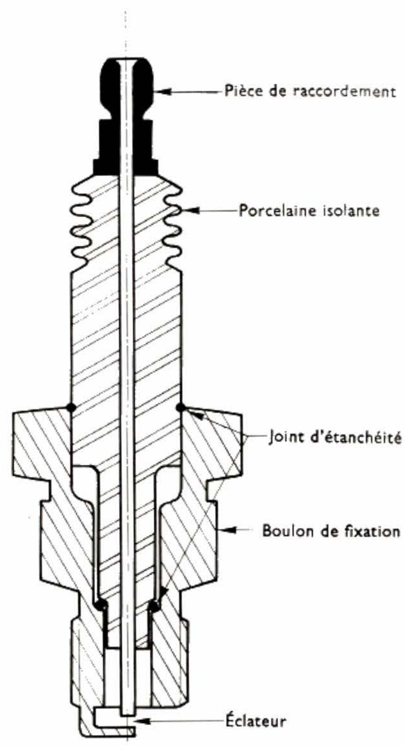


Fig. XXIII-4 a

Coupe d'une bougie



Fig. XXIII-4 b

Bougie ; vue extérieure (*S.E.V. Marchal*)

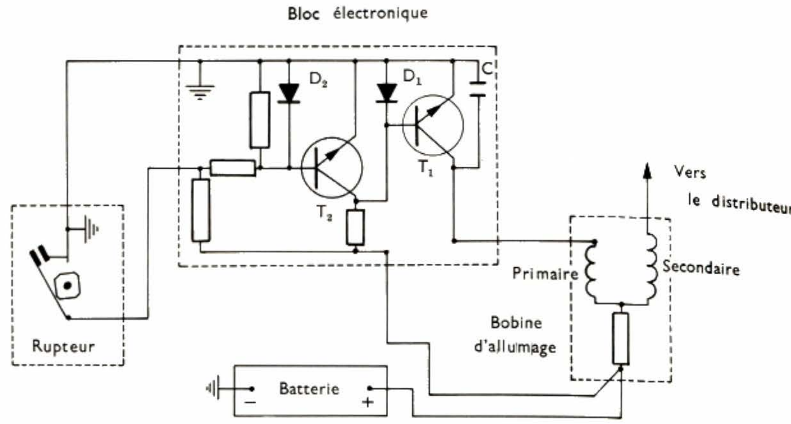


Fig. XXIII-5

Schéma de principe d'allumage électronique transistorisé

D_1 et D_2 : diodes
C : condensateur
T_1 et T_2 : transistors
Lorsque le rupteur mécanique est fermé, T_2 est bloqué (sa base est au même potentiel que son émetteur puisque le rupteur est fermé) et T_1 conduit : le circuit primaire est parcouru par un courant. À l'ouverture des contacts, T_2 conduit et T_1 cesse de conduire : le courant primaire est coupé. La tension secondaire augmente et une étincelle éclate à la bougie (*Ducellier-G. Gory « Connaissance de l'électronique automobile »*)

et à l'usure produite par un grand nombre d'étincelles ; c'est généralement un alliage à base de nickel. Il en est de même pour l'électrode de masse qui est soudée latéralement sur la partie métallique filetée entourant la porcelaine. Cette partie, en forme de boulon hexagonal, a pour but, d'une part, de permettre la fixation sur le cylindre et, d'autre part, d'assurer l'étanchéité à la pression. Intérieurement des joints sont prévus entre la porcelaine et le sertissage la fixant sur le boulon ; extérieurement la bougie est serrée sur la culasse du moteur avec un joint d'étanchéité.

Tous les moteurs n'ont pas les mêmes caractéristiques. Certains chauffent plus que d'autres : les points où sont prévus l'emplacement des bougies et des soupapes, le taux de compression, la forme de la culasse influent sur la température des bougies. Si certaines précautions n'étaient pas respectées, les électrodes des bougies deviendraient incandescentes et produiraient des allumages intempestifs pouvant provoquer des dégâts au moteur. Dans le cas le moins défavorable on observe de l'auto-allumage, c'est-à-dire que, même en coupant le courant de la bobine, le moteur continue à tourner (dans de mauvaises conditions cependant).

Pour remédier à cet inconvénient, les constructeurs de bougies ont été amenés à construire des bougies dont la partie interne évacue plus ou moins rapidement la chaleur produites aux électrodes. C'est en modifiant la forme de la partie interne de la porcelaine et la partie filetée qu'on obtient ce résultat. Les bougies peuvent ainsi être classées en catégories, de la plus chaude à la plus froide.

La partie extérieure de la porcelaine est émaillée pour éviter que, lors d'un arrêt prolongé en atmosphère humide, la porcelaine poreuse se charge d'humidité et dérive l'impulsion de tension vers la masse, rendant impossible le démarrage et provoquant des ratés d'allumage. L'extrémité extérieure de l'électrode centrale comporte une pièce en laiton, normalisée, en forme d'ogive, permettant le raccordement du câble conduisant l'impulsion de tension. Elle est généralement recouverte d'un capuchon de caoutchouc, toujours pour éviter des dérivations de l'impusion de tension vers la masse.

1.3. Allumage électronique. — Les moteurs tournent de plus en plus vite, et l'allumage ordinaire — par rupteur et bobine — a l'inconvénient de donner des tensions de plus en plus faibles à mesure que la vitesse de rotation croît. Au-delà de 10 000 tours par minute, il assure difficilement l'allumage, et des ratés apparaissent diminuant la puissance motrice.

Les moteurs des voitures de compétition approchent et dépassent même ces vitesses, aussi utilise-t-on des circuits électroniques dont la constante de temps est très faible pour améliorer l'allumage aux grandes vitesses. Les systèmes actuels sont innombrables ; cependant, nous pouvons grossièrement les classer en deux catégories :

1° *L'allumage transistorisé* (fig. XXIII-5). — Dans ce système, on utilise encore un allumeur avec rupteur ordinaire et système d'avance, mais le condensateur est supprimé, le rupteur n'étant plus parcouru que par un très faible courant. C'est un transistor de petite puissance qui commande alors un autre transistor capable de délivrer un courant important dans le primaire d'une bobine spéciale dont l'inductance primaire peut être mille fois plus faible que celle d'une bobine ordinaire. Le temps d'établissement du courant s'en trouve réduit d'autant, et la haute tension délivrée par le secondaire présente toujours la même valeur jusqu'à des vitesses de rotation élevées. La plus grande vitesse de fonctionnement dépend de la possibilité d'imposer au rupteur de suivre mécaniquement les bossages de la came).

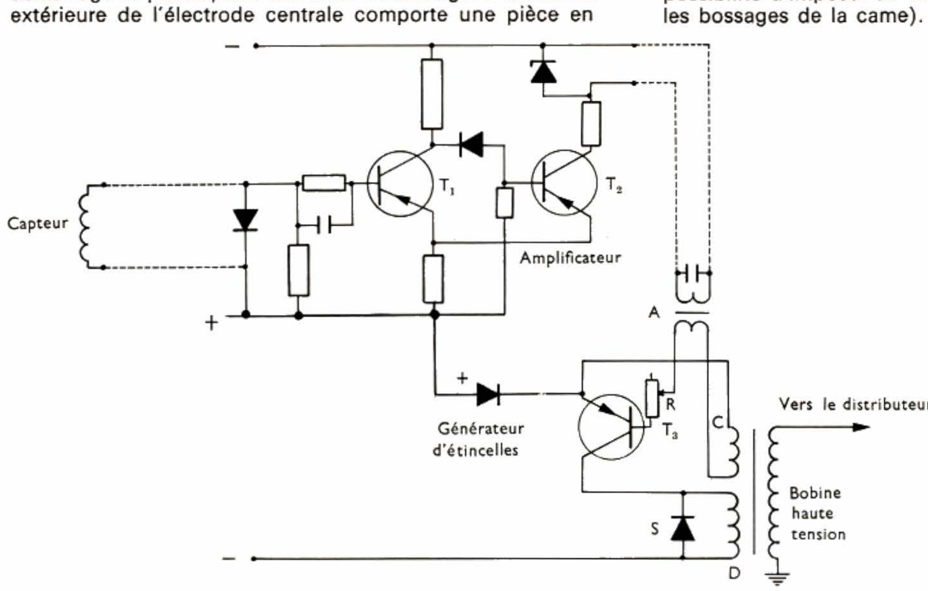


Fig. XXIII-6

Schéma de principe d'allumage électronique sans rupteur
Le capteur fournit une impulsion à chaque passage de plots en acier doux disposés de façon équidistante sur le volant du moteur (le nombre de plots est égal à la moitié du nombre de cylindres) ; un amplificateur de déclenchement envoie un courant d'environ 60 mA au générateur d'étincelles et coupe ce courant, ce qui déclenche l'allumage, à chaque impulsion du capteur
(*Lucas - G. Gory « Connaissance de l'électronique automobile »*)

Comme l'énergie fournie doit être la même que dans l'allumage précédent, le courant primaire est extrêmement intense, puisque la diminution de l'inductance est obtenue par une réduction du nombre de tours de l'enroulement du primaire de la bobine (dans tous les cas il faut que le produit du nombre de tours de cet enroulement et de l'intensité du courant ait une valeur suffisante).

2° *L'allumage sans rupteur* (fig. XXIII-6). — Pour supprimer le dernier organe mécanique (l'allumeur), on utilise un circuit électronique plus complexe. On cale un disque directement sur l'arbre du vilebrequin ; il tourne avec lui et il est soit perforé dans le cas d'une commande optique, soit muni de petits aimants ou de pièces polaires dans le cas d'une commande magnétique.

Par ces deux procédés on obtient un signal électrique, soit lorsqu'une perforation se présente entre une lampe et un phototransistor, soit lorsqu'un aimant ou une pièce polaire passe devant le circuit magnétique d'un capteur. Ce signal amplifié va commander à son tour un circuit à transistors alimentant une bobine d'allumage. Ce système onéreux présente de grands avantages. En effet, la commande de l'étincelle aux bougies est extrêmement précise puisqu'elle est solidaire de l'arbre du vilebrequin et n'est pas influencée par les jeux mécaniques qui existent dans la commande de l'allumeur ordinaire : jeu entre l'arbre du vilebrequin et l'arbre secondaire entraînant l'allumeur deux fois moins vite, jeu entre cet arbre secondaire et l'entraînement de l'allumeur, jeu des paliers et de la came de l'allumeur (jeux qui s'aggravent dans le temps du fait de l'usure). Aux défauts qui sont ainsi évités il convient d'ajouter l'usure des contacts du rupteur et les rebondissements mécaniques de ce dernier aux grandes vitesses.

Comme il n'y a aucun frottement ni contact dans les pièces commandant cet allumage, le calage fait à l'origine se maintient sans déréglage pendant toute la durée de vie du moteur. Cependant, les problèmes d'avance à l'allumage sont plus délicats à réaliser et augmentent encore le prix de tels systèmes.

On peut aussi utiliser, comme principe d'allumage électronique, la décharge brusque d'un condensateur dans une ou plusieurs bobines. Bien qu'actuellement chers, ces systèmes électroniques s'imposeront par leurs qualités dès que leur prix deviendra compétitif par rapport à l'allumage traditionnel.

1.4. Câbles antiparasites. — Pour éviter de troubler la réception des émissions radioélectriques, les câbles conduisant l'impulsion de tension de la bobine au distributeur et du distributeur aux bougies sont constitués par un conducteur de forte résistance électrique, isolé par une couche épaisse capable de résister sans claquage aux tensions élevées engendrées par la bobine. Quelquefois on place une résistance additionnelle dans une extrémité du câble. Dans tous les cas, la résistance du câble (avec la résistance éventuelle) est proche de 15 000 ohms. Elle atténue l'effet d'antenne d'émission de ces câbles lorsque l'impulsion de tension y circule. Souvent une résistance voisine de 5 000 ohms est placée dans le disrupteur tournant de l'allumeur pour limiter l'effet émissif de l'étincelle produite à ce niveau. Les valeurs importantes des résistances utilisées ne doivent pas étonner : ces circuits sont traversés par des courants extrêmement faibles et les chutes de tension produites sont négligeables devant la valeur de crête de l'impulsion de tension. En revanche, de telles résistances amortissent fortement toute oscillation et donc toute émission radioélectrique.

2. ÉQUIPEMENT ÉLECTRIQUE

L'équipement électrique d'un véhicule moderne comporte de nombreux organes. Certains sont essentiels à la marche même du moteur, comme l'alternateur ou la dynamo, la batterie d'accumulateurs et le système d'allumage ; d'autres sont nécessaires comme le contacteur-disjoncteur et le régulateur de tension. Divers organes ont été installés pour faciliter l'utilisation du véhicule (le démarreur par exemple), sa conduite et son entretien.

2.1. Dynamo. — C'est l'organe utilisé pour charger la batterie et la maintenir vers son maximum de capacité. La dynamo est construite exactement comme un moteur à courant continu (V. t. 1, Électrotechnique, chap. 14). Elle comporte un induit tournant dans le champ magnétique engendré par les inducteurs fixes (fig. XXIII-7).

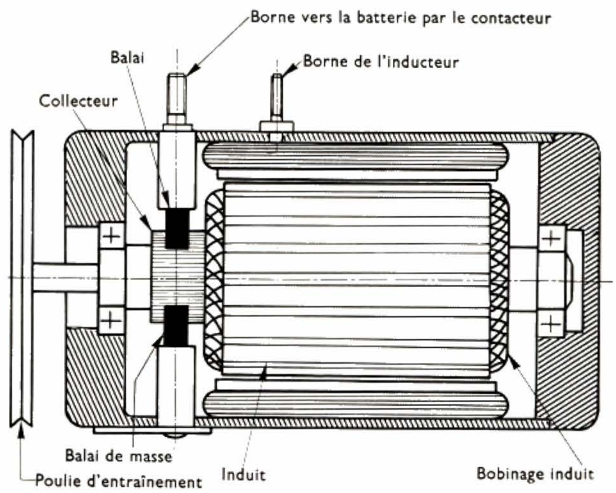
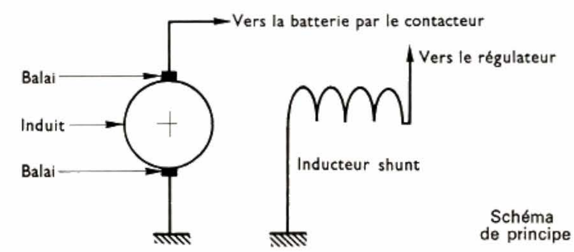


Fig. XXIII-7 — Montage d'une dynamo (*S.E.V. Marchal*)



Le circuit magnétique est formé par la carcasse même de la dynamo, et comporte généralement deux pièces polaires en fer centrées sur l'induit ; ces pièces polaires sont entourées par l'enroulement d'excitation généralement de type dérivation (ou shunt).

L'induit est composé d'un circuit magnétique à encoches, solidaire de l'arbre, dans lesquelles sont placées les spires du bobinage générateur, reliées au collecteur tournant calé sur l'arbre.

Lorsque l'induit tourne, ces spires coupent les lignes d'induction du champ de l'inducteur, ce qui induit un courant qui change de sens deux fois par tour. Le collecteur jouant le rôle d'un redresseur mécanique tournant, les balais, placés en deux points convenablement choisis, permettent de recueillir un courant continu.

L'axe de l'induit est le plus souvent monté sur roulements à billes et une de ses extrémités porte une poulie qui permet l'entraînement par une courroie.

Le débit est ajusté automatiquement à la consommation du moment par un régulateur de tension qui agit sur l'enroulement d'excitation de la dynamo.

De plus en plus, les dynamos cèdent la place aux alternateurs moins encombrants, sans collecteur, et débitant même au ralenti (cas de la circulation urbaine).

2.2. Alternateur. — Associé à un redresseur, il joue le même rôle que la dynamo, mais présente des avantages sur celle-ci : encombrement moindre à puissance égale, possibilité de charge au ralenti, pas de collecteur mais des bagues lisses supportant seulement le faible courant d'excitation (d'où une usure faible des balais alors que les balais d'une dynamo sont traversés par la totalité du courant fourni.)

Contrairement à la dynamo, c'est la partie fixe, appelée stator, qui fournit l'énergie, la partie tournante, ou rotor, servant seulement d'inducteur.

Nous pouvons distinguer :

— L'alternateur monophasé, de rendement médiocre mais peu coûteux qui est utilisé sur les véhicules n'ayant pas un équipement électrique trop important.

— L'alternateur triphasé, de meilleur rendement et de puissance plus grande (certains d'entre eux pouvant débiter jusqu'à 100 ampères). Des modèles de toutes puissances peuvent d'ailleurs être construits suivant les besoins (fig. XXIII-8).

continu. Aussi l'équipement interne de l'alternateur comprend-il un redresseur formé par six diodes au silicium (deux par phase) montées sur des radiateurs de refroidissement (les alternateurs monophasés ne nécessitent que deux diodes). À la sortie du redresseur on dispose donc de courant unidirectionnel tout comme avec une dynamo.

La densité de courant dans les enroulements et les diodes étant assez grande, l'échauffement est important et un ventilateur monté sur l'arbre même de l'alternateur refroidit énergiquement l'ensemble.

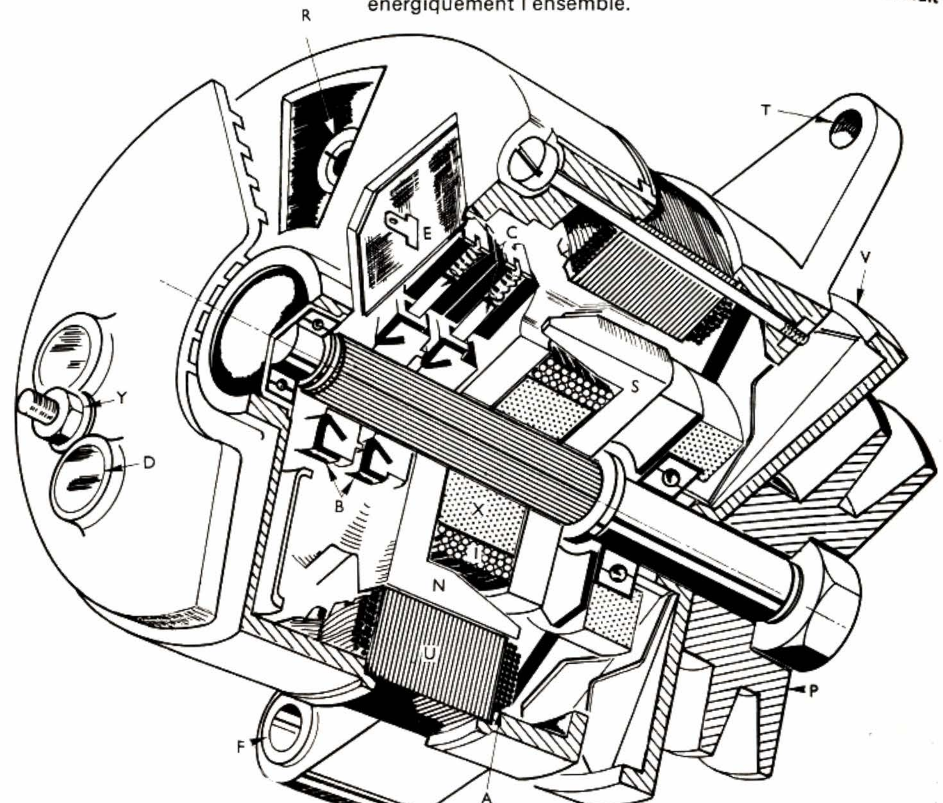


Fig. XXIII-8

Alternateur triphasé (*S.E.V. Marchal*)
R : une des diodes du redresseur
E : borne d'excitation
C : charbons amenant le courant d'excitation
T : fixation du tendeur de courroie
V : ventilateur
P : poulie motrice
X : noyau magnétique
I : bobinage inducteur tournant
A : bobinage stator
NS : pôles d'excitation
U : tôles du stator
F : trou pour fixation
B : bagues recevant le courant inducteur
D : diode d'arrêt
Y : borne d'utilisation du courant

Le stator de l'alternateur triphasé est constitué d'un empilage de tôles feuilletées, portant un certain nombre d'encoches. Il y a trois enroulements bobinés dans ces encoches (un par phase). Ils sont convenablement disposés les uns par rapport aux autres pour fournir un système triphasé de tensions. Ces enroulements peuvent être réunis en montage triangle ou étoile tout comme les alternateurs de grosse puissance (V. t. 1, Électrotechnique, chap. 9).

Le rotor ne comporte qu'un enroulement. Pour des raisons d'économie, il n'est pas bobiné comme sur les alternateurs de grande puissance mais simplement autour d'un noyau cylindrique de fer doux, emmanché à la presse sur l'arbre de l'alternateur. Sur les extrémités de ce noyau apparaissent donc un pôle nord et un pôle sud dès que le bobinage d'excitation est parcouru par un courant continu. Le champ magnétique est canalisé à chaque extrémité par une pièce polaire portant six ou huit pôles imbriqués alternativement avec ceux venant de l'autre pièce polaire. Ces pièces polaires sont repliées pour passer devant les encoches du stator avec un entrefer de 0,2 à 0,3 mm.

De cette façon, lorsque le rotor tourne, les tôles à encoches du stator « voient » passer successivement devant elles un pôle nord, puis un pôle sud et ainsi de suite, ce qui engendre un courant alternatif dans les spires du bobinage statorique.

La vitesse de rotation est toujours supérieure à celle d'une dynamo, et la poulie d'entraînement est conçue pour que l'alternateur tourne un peu plus de deux fois plus vite que le moteur qui l'entraîne.

Tel quel, le courant alternatif engendré serait impropre à recharger une batterie et il est nécessaire de le transformer en courant unidirectionnel appelé improprement courant

Pour éviter l'emploi d'un contacteur-disjoncteur, les alternateurs sont souvent munis d'une diode supplémentaire appelée diode d'arrêt, placée entre la borne de sortie du courant redressé et la borne allant vers la batterie. Cette diode est disposée de telle sorte qu'elle laisse passer le courant de charge de l'alternateur vers la batterie, mais qu'elle s'oppose au courant de la batterie vers l'alternateur, ce qui évite de laisser sous tension l'enroulement d'excitation raccordé dans l'alternateur en amont de cette diode d'arrêt.

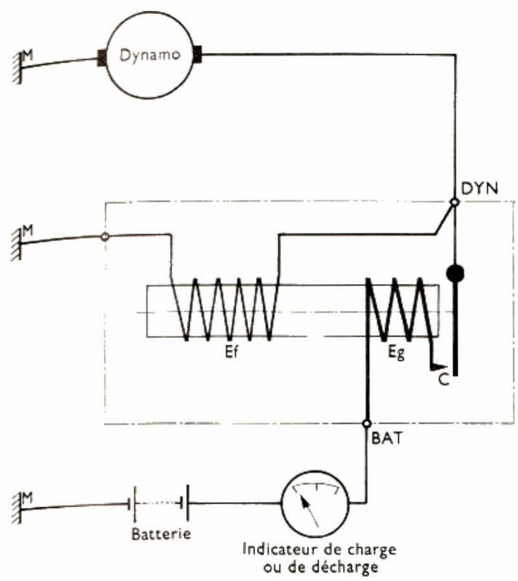
Un régulateur de tension est nécessaire, tout comme pour une dynamo, pour adapter le courant de charge au débit demandé lorsqu'on utilise partiellement ou totalement les divers organes électriques du véhicule.

2.3. Contacteur-disjoncteur. — Cet organe, généralement monté avec la dynamo, joue le même rôle que la diode d'arrêt d'un alternateur.

En effet, lorsque le moteur du véhicule ralentit ou s'arrête, la tension délivrée par la dynamo devient très faible ou nulle, alors que la batterie qui vient d'être chargée peut débiter un courant important.

S'il n'y avait pas à ce moment une coupure entre la batterie et la dynamo, cette dernière se comporterait comme un moteur électrique et consommerait le courant provenant de la batterie. Cette consommation serait d'ailleurs très importante lorsque le moteur serait arrêté : la dynamo étant accouplée par une courroie au moteur à essence, elle tendrait à l'entraîner et, comme sa puissance n'est pas suffisante pour cette fonction, elle tournerait à peine en s'échauffant beaucoup et elle pourrait être détruite.

Le contacteur-disjoncteur est constitué par un relais à deux enroulements, muni d'un contact dimensionné pour supporter le courant de charge (fig. XXIII-9).



Ef : enroulement de tension en fil fin
Eg : enroulement d'intensité en gros fil
C : contact
M : masses

Fig. XXIII-9

Contacteur-disjoncteur

Un des enroulements comporte un grand nombre de tours de fil fin et est connecté aux bornes de la dynamo (il est donc sensible à la tension de cette dernière).

L'autre enroulement comporte quelques tours de très gros fil, relié d'un côté à la dynamo et de l'autre à l'un des contacts du relais, l'autre contact étant relié à la batterie.

Lorsque la dynamo commence à tourner, la tension à ses bornes augmente. Lorsqu'elle atteint la valeur prévue pour l'enclenchement du relais (environ 14 volts), ce dernier attire son armature et ferme son contact qui réunit, à ce moment, le fil venant de la dynamo et la batterie à travers l'enroulement de gros fil. Le courant de charge passant par cet enroulement augmente encore l'attraction du relais et améliore le contact. La tension aux bornes de la dynamo étant légèrement supérieure à ce moment à celle de la batterie, celle-ci se charge.

Lorsque le moteur ralentit, la tension aux bornes de la dynamo diminue et il arrive un moment où elle devient inférieure à celle aux bornes de la batterie : celle-ci a tendance à se décharger dans la dynamo. Mais le courant dans l'enroulement en gros fil ayant changé de sens, son action est opposée à celle de l'enroulement en fil fin dont l'action est annulée : le relais cesse d'attirer son armature qui, en retombant, coupe le contact entre la dynamo et la batterie. Lors d'une nouvelle accélération, le contact est rétabli. Le réglage étant délicat, cet appareil est généralement recouvert d'un capotage serti pour éviter toute manipulation intempestive.

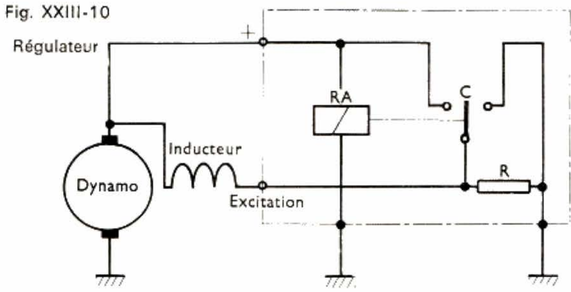
2.4. Régulateur de courant. — Si aucun organe n'intervenait, la dynamo ou l'alternateur chargerait la batterie à un régime qui dépendrait uniquement de la vitesse de rotation du moteur, sans tenir compte de la consommation qui peut être très variable suivant qu'on roule de nuit tous feux allumés, ventilateur et essuie-glaces en route, etc. ou de jour, tous feux éteints.

Il est donc indispensable d'adapter le courant de charge à une valeur variable suivant la consommation. C'est le rôle du régulateur (fig. XXIII-10). Il peut être, soit électromécanique, soit électronique.

1° *Régulateur électromécanique* (fig. XXIII-11). — C'est un relais sensible à la tension et fonctionnant à la façon d'une sonnerie trembleuse. Il agit sur la tension d'excitation de l'alternateur ou de la dynamo.

L'armature de ce relais entraîne un contact vibrant qui peut se déplacer entre deux autres contacts fixes. Une résistance *R* est connectée entre le contact vibrant et le contact du haut. Si la tension aux bornes de l'enroulement est faible,

Fig. XXIII-10



RA : relais vibrant R : résistance d'excitation C : contacts

l'armature — rappelée par un ressort — remonte et vient toucher le contact du haut. Lorsque ce contact est établi, la résistance *R* se trouve court-circuitée et, comme elle est normalement en série dans l'inducteur, le courant dans cet enroulement augmente. Mais aussitôt la tension à ses bornes croît et l'armature est de nouveau sollicitée vers le bas, rétablissant la résistance en série dans l'inducteur dont le courant diminue. Ces déplacements se font à une fréquence très grande et le courant d'excitation est haché, son intensité oscillant entre un maximum et un minimum en même temps que le contact mobile passe de la position haute à la position basse.

S'il se trouve que la tension reste élevée (cas de la batterie en fin de charge) l'armature est plus souvent en bas qu'en haut, et le courant moyen d'excitation n'est pas très grand.

Le contact inférieur est relié à la borne de la dynamo, de sorte que, si l'armature vient vibrer vers le contact du bas, l'enroulement d'excitation est mis hors circuit et la dynamo ne débite plus à chaque contact. Cela diminue encore le courant moyen d'excitation.

Au contraire, si la tension baisse, l'armature est de moins en moins attirée et est presque toujours sur le contact du haut : le courant moyen de charge tend vers sa valeur maximale

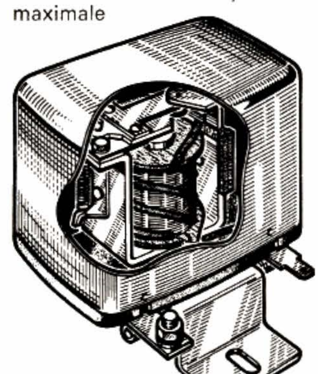


Fig. XXIII-11

Régulateur vibrant *(S.E.V. Marchal)*

2° *Régulateur électronique* (fig. XXIII-12). — Les systèmes sont innombrables, mais le principe est analogue à celui des régulateurs vibrants. Dans ce cas cependant il n'y a pas de relais ni de contact, donc aucune usure de pièce.

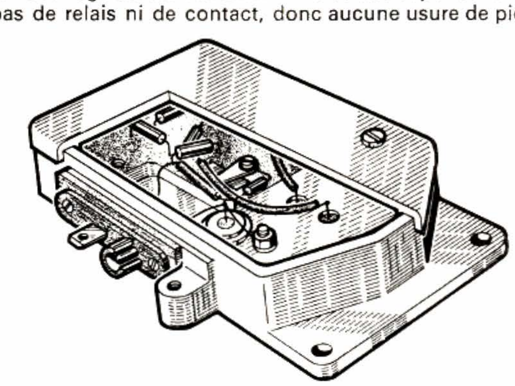


Fig. XXIII-12 — Régulateur électronique (*S.E.V. Marchal*)

On utilise généralement le temps de charge et de décharge d'un circuit composé d'un petit condensateur et d'une résistance, associés en série, pour provoquer des coupures du courant d'excitation de l'alternateur ou de la dynamo mais à une fréquence plus grande que celle des régulateurs électromécaniques.

Suivant la tension appliquée à ce régulateur, le temps de conduction varie par rapport au temps de coupure du courant d'excitation, ce qui produit un courant moyen variable suivant la consommation du véhicule et l'état de charge de la batterie.

Ces appareils sont indéréglables mais, en cas de fausse manœuvre, ils sont plus fragiles que les régulateurs vibrants. Tous les garagistes ne sont pas toujours informés des manœuvres à éviter. L'habitude prise avec les régulateurs vibrants de s'assurer de leur bon fonctionnement en touchant la masse du véhicule avec le fil provenant de la borne « excitation » du régulateur (pour voir s'il y a une étincelle prouvant le bon fonctionnement de régulateur vibrant) devient une catastrophe avec un régulateur électronique. Cette manœuvre détruit à coup sûr le transistor de puissance qui régule la tension d'excitation. Après cette destruction, le courant de charge n'étant plus régulé il reste à sa valeur maximale tant que le véhicule roule. La batterie surchargée se met à bouillir et déborder ; l'acide renversé peut provoquer de graves dégâts sur le moteur et les accessoires.

2.5. Démarreur. — Les moteurs à combustion interne ne démarrant pas par eux-mêmes, il est nécessaire de les entraîner à une vitesse de rotation suffisante pour que les premières explosions apparaissent.

Les démarreurs employés sur les moteurs d'automobiles sont des moteurs électriques fonctionnant sur la batterie du véhicule (fig. XXIII-13). Ils doivent être assez puissants pour pouvoir décoller le mécanisme et assurer la compression. Ils sont généralement surchargés en puissance, mais, comme ils ne travaillent qu'un temps très court, l'échauffement reste acceptable.

L'enroulement d'excitation est du type série, ce qui assure un couple très élevé au démarrage ; alimenté sous la tension relativement faible de la batterie, ce moteur absorbe un courant très intense pouvant atteindre et même dépasser 100 ampères sur une voiture particulière. Les balais venant en contact avec le collecteur sont de forte section et sont très chargés en cuivre pour diminuer leur résistance.

Il est inutile de continuer à faire tourner le démarreur dès que le moteur fonctionne et un système mécanique ou à relais plongeur provoque le déplacement d'un pignon d'entraînement sur l'arbre du démarreur. Ce pignon s'engrène avec une couronne dentée, généralement fixée sur le plateau d'embrayage, lui-même calé sur l'arbre du moteur. Lorsqu'on relâche le câble mécanique du démarreur ou qu'on coupe le contact du relais de démarrage, un ressort rappelle le pignon d'entraînement hors de la denture du plateau d'embrayage qui, lui, continue à tourner, le moteur étant lancé.

Le relais ou le câble agissent en même temps sur un contact de très forte section pouvant supporter le courant très intense exigé au démarrage ; au repos ce contact est coupé.

Certains systèmes utilisent un induit décalé dans le sens de la longueur par rapport aux pôles inducteurs et maintenu dans cette position par un ressort. En bout d'arbre se trouve le pignon qui n'est pas en prise avec la couronne dentée.

Sous l'influence du courant d'appel dans l'induit, lorsqu'on établit le contact du démarreur, l'induit est fortement sollicité pour venir se centrer sous les pôles inducteurs ; il entraîne avec lui le pignon qui s'engrène avec le plateau denté et comprime le ressort aussi longtemps qu'on garde le contact établi. Lorsqu'on coupe le contact, le ressort ramène l'induit à sa position primitive et l'engrenage se libère de la couronne dentée.

Compte tenu de la forte intensité du courant exigé, les câbles venant de la batterie au relais et du relais au démarreur sont de très forte section pour éviter une chute de tension importante lors du démarrage.

2.6. Éclairage et signalisation. — Pour être en conformité avec les règlements de la circulation, un véhicule doit posséder un éclairage le signalant aux autres usagers de la route. Il doit aussi être équipé de signaux lumineux indiquant ses manœuvres prochaines aux autres automobilistes.

2.6.1. Éclairage de ville. — Les rues des villes étant généralement éclairées pendant la nuit, il est suffisant et

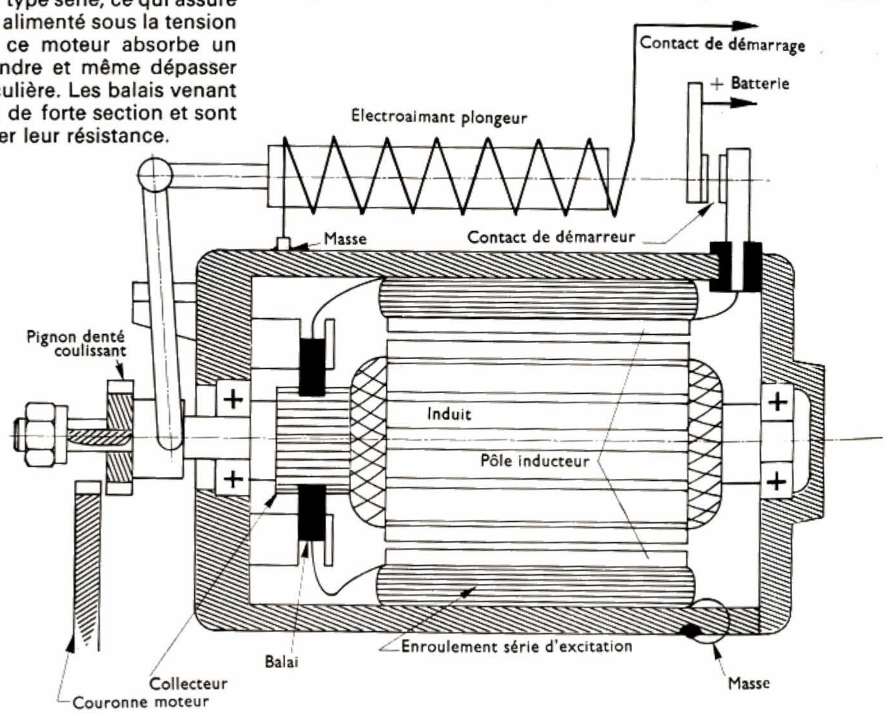
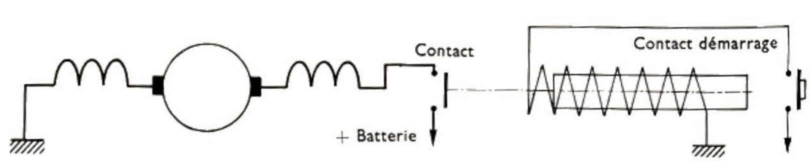


Fig. XXIII-13

Démarreur
(*S.E.V. Marchal*)

Schéma de principe



obligatoire de posséder à l'avant deux lanternes blanches non éblouissantes, et à l'arrière deux feux rouges. Ces feux, placés latéralement, indiquent le gabarit du véhicule. En outre, les règlements exigent que la plaque d'immatriculation soit éclairée la nuit. Ces feux sont actuellement intégrés à la carrosserie et la plupart du temps sont en matière plastique moulée.

2.6.2. Signalisation. — Toute modification de direction, toute intention d'arrêt doivent être signalées aux autres conducteurs ou usagers de la route.

1° *Catadioptres.* — Bien que n'étant pas des appareils électriques puisqu'ils sont destinés au contraire à remédier à une absence accidentelle de courant, il faut les indiquer ici : ce sont des miroirs réfléchissants dont la surface est composée d'une multitude de lentilles ayant la propriété de renvoyer la lumière dans la direction d'où elle émane. Ainsi un conducteur arrivant derrière un véhicule non éclairé reçoit la lumière de ses propres projecteurs réfléchie à travers un écran rouge par les catadioptres du véhicule qui est devant lui. Ces catadioptres sont généralement intégrés aux lanternes rouges à l'arrière du véhicule.

2° *Stop.* — Lorsqu'on appuie sur la pédale de freinage, un interrupteur solidaire de cette pédale établit un contact permettant l'allumage d'au moins une lampe rouge, de puissance supérieure à celle des feux rouges d'éclairage, placée à l'arrière. Beaucoup de véhicules sont équipés de deux lampes stop et, même sur les voitures n'ayant que la lampe réglementaire, il est facile de monter la deuxième car son emplacement est prévu dans les lanternes arrière. Ces lampes sont souvent aussi intégrées dans l'ensemble feu rouge, catadioptre, clignotant.

3° *Indicateur de direction.* — Appelés aussi clignotants parce que leur émission lumineuse est soumise à un cycle d'intermittence, ils émettent une lumière blanche s'ils sont placés à l'avant, et une lumière orangée ou rouge s'ils sont fixés à l'arrière. Ceux de l'arrière sont souvent intégrés à l'ensemble feu de position, stop et catadioptre. Ceux de l'avant sont souvent indépendants des autres systèmes lumineux.

Lorsque le conducteur a l'intention de tourner à droite ou à gauche, il doit le signaler aux autres usagers. Pour ce faire, il agit sur une commande, généralement un levier qui peut prendre — hors la position de repos — deux autres positions. Dans l'une, les clignotants arrière et avant situés du côté gauche sont alimentés, dans l'autre ce sont les clignotants placés du côté droit. En même temps, ce levier permet d'alimenter un dispositif qui établit et coupe le courant à une cadence d'environ deux fois par seconde de telle sorte que les lampes des clignotants donnent des éclats lumineux à la même cadence. Le nombre de ces systèmes temporisateurs est assez grand : on utilise souvent une bilame autour de laquelle un fil résistant est enroulé. Lorsque le courant parcourt cet enroulement, il échauffe la bilame qui se cambre en coupant un contact. Sitôt le contact coupé, elle se refroidit et le contact est rétabli ; un autre cycle peut alors commencer.

On utilise aussi des mouvements d'horlogerie avec une roue à rochet coupant régulièrement en cadence le courant des lampes indicatrices de direction. De même, l'emploi de systèmes hydrauliques, pneumatiques ou électroniques peut assurer les mêmes fonctions.

Sur certains véhicules, le conducteur est seul maître de la durée du signalement ; sur d'autres, dès le virage terminé, lorsque le volant est redressé, un dispositif assure le retour du levier de commande à sa position de repos. Cet automatisme présente l'avantage d'éviter les omissions et le clignotement des lampes plus longtemps que nécessaire. Cependant, ce système a aussi un inconvénient : dans un virage, un coup de volant en sens inverse du sens de braquage désiré provoque l'arrêt du clignotement et, si un autre véhicule arrive à ce moment, il n'est plus prévenu du changement de direction en cours.

Tant que les feux clignotants fonctionnent, une lampe placée sur le tableau de bord rappelle au conducteur qu'ils sont en service. Quelquefois un signal sonore double ce témoin lumineux.

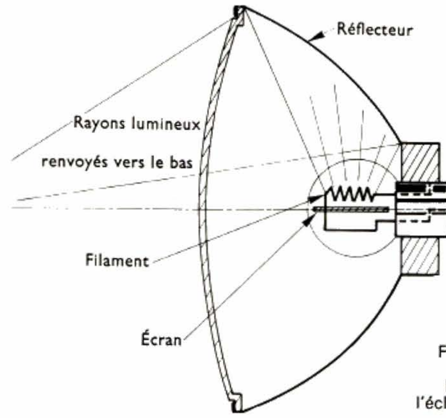


Fig. XXIII-14

Principe de l'éclairage « code »

2.6.3. Feux de route. — Les feux de route sont destinés à éclairer la route durant la nuit aussi loin que possible devant le conducteur (au minimum jusqu'à 100 mètres) (V. t. 2, Éclairage électrique, chap. 3, § 1.5).

a) *Feux de route et feux de croisement* (fig. XXIII-14). Ils sont obligatoires. — Les feux de croisement doivent être éclairés et les projecteurs éteints lors du croisement avec un autre véhicule pour éviter d'éblouir le conducteur de ce dernier. Un feu de route et un feu de croisement sont, généralement intégrés dans la même lampe (lampe phare-code). Les feux de croisement éclairent à environ 50 mètres en avant du véhicule, plus bas que le pare-brise du véhicule venant en face. Toutefois l'éclairage dit code européen prévoit une distance d'éclairement plus grande à droite qu'à gauche, permettant une meilleure visibilité du côté droit de la route sans gêner l'automobiliste venant de face.

La lampe phare-code est conçue de la façon suivante : elle possède deux filaments mis en service par l'interrupteur phares-codes. En position feux de route (« phare »), c'est le filament centré dans le réflecteur qui est allumé et la lumière est réfléchie en totalité vers l'avant pour éclairer la route. En position feux de croisement (« codes »), le filament « phare » s'éteint et un autre filament décentré s'allume. Un écran métallique, à l'intérieur de l'ampoule, empêche les rayons issus de ce filament d'aller vers le bas du réflecteur ; seul le haut reçoit la lumière et, par réflexion, éclaire le bas de la route. Dans le cas du code européen asymétrique, l'écran est décalé de 15° par rapport à l'horizontale, ce qui permet d'éclairer plus à droite qu'à gauche en orientant convenablement la lampe.

On utilise de plus en plus les lampes à halogènes qui, montées dans des ampoules en quartz fondu, permettent d'obtenir une température plus élevée et un rendement lumineux supérieur. Souvent, ces lampes équipent des projecteurs supplémentaires qui ajoutent leur action à celle des projecteurs normaux. Sur certains véhicules, les projecteurs s'orientent à droite ou à gauche lorsqu'on tourne le volant, ce qui permet d'éclairer le virage.

Il est souvent prévu un réglage manuel de la hauteur d'éclairage, les projecteurs ayant deux positions d'inclinaison qu'on peut modifier en agissant sur un levier pour corriger l'assiette du véhicule suivant son chargement. Certains véhicules de luxe possèdent une correction d'assiette automatique, ce qui évite que les codes réglés trop hauts ne jouent plus leur rôle et aveuglent le conducteur venant en face.

En France, la loi rend obligatoire la lumière jaune pour les projecteurs et les codes. Le verre qui constitue les ampoules est teinté en jaune.

La lumière jaune éblouit autant que la lumière blanche, mais la rétine récupère plus vite ses facultés après un éblouissement par une lumière jaune qu'après celui provoqué par une lumière blanche. Comme l'œil humain est très sensible au jaune, la diminution de lumière apportée par les verres d'ampoules jaunes est peu sensible.

b) *Antibrouillards.* — Ils ne sont pas obligatoires mais sont très utiles par temps de brume. Il en existe à filament et à lampe à halogènes. Ils doivent être placés très bas pour éclairer le bas-côté de la route par temps brumeux. De par

leur position, ils sont exposés à recevoir des projections de cailloux et sont souvent revêtus d'un capuchon de plastique protecteur lorsqu'ils ne sont pas utilisés.

2.6.4. Feux de position. — Toutes les voitures n'en sont pas équipées. Ils sont surtout utiles lorsqu'on est obligé de garer la nuit dans un lieu non éclairé, à la campagne, par exemple, pour signaler qu'un véhicule stationne. Comme ils sont appelés à rester allumés de longues heures, les lampes qui les équipent sont de faible puissance pour éviter de décharger par trop la batterie d'accumulateurs.

Généralement, un petit cabochon de matière plastique translucide, coloré en blanc vers l'avant et en rouge vers l'arrière, abritant une lampe, est monté de chaque côté de la voiture, de préférence sur un point en saillie de la carrosserie. Un interrupteur à deux positions permet d'allumer la lampe droite ou la lampe gauche suivant la position du véhicule.

2.6.5. Éclairage intérieur. — Généralement une lampe d'éclairage est montée à l'intérieur du véhicule. La plupart du temps elle est commandée par des interrupteurs qui ferment leur contact lorsqu'on ouvre les portières avant. En plus, un interrupteur à main est prévu pour pouvoir l'allumer même lorsque les portes sont fermées.

Quelquefois une lampe est prévue pour les passagers arrière; son faisceau lumineux est très étroit pour ne pas gêner le conducteur tout en permettant la lecture d'une carte ou d'un texte.

On trouve aussi souvent une lampe éclairant la malle lorsqu'on l'ouvre; elle permet de rechercher commodément un objet de nuit.

Sur certaines voitures, une prise de courant est installée dans le but de raccorder une baladeuse pour s'éclairer de nuit, pour changer de roue ou effectuer un contrôle sous le capot.

2.6.6. Feu de recul. — Des voitures sont équipées d'un projecteur placé à l'arrière qui s'allume lorsqu'on enclenche la marche arrière; il permet de voir derrière soi lorsqu'on effectue une manœuvre de recul. Ces feux de recul sont souvent analogues aux projecteurs antibrouillards.

2.7. Moteurs de servitude. — Ils deviennent chaque jour plus nombreux et augmentent considérablement la commodité d'emploi d'une automobile. Ils remplacent peu à peu toutes les commandes manuelles qui s'automatisent et assurent de nouvelles fonctions. Ce sont toujours des moteurs à courant continu alimentés par la batterie d'accumulateurs (fig. XXIII-15 et XXIII-16).

2.7.1. Refroidisseurs. — Pour éviter de faire fournir inutilement de la puissance au moteur en lui demandant d'entraîner en permanence le ventilateur (ce qui est inutile par temps froid et au démarrage), on utilise de plus en plus des ventilateurs de refroidissement du radiateur mus par des moteurs électriques. Un thermostat (interrupteur sensible à la température), ferme son contact quand la température de l'eau de refroidissement atteint une certaine valeur et le moteur est mis en route.

2.7.2. Climatisation. — Tous les véhicules modernes possèdent un radiateur de chauffage placé en dérivation sur le circuit d'eau de refroidissement. Un robinet permet de l'isoler ou de le mettre en service.

Ce radiateur est généralement monté dans un boîtier en matière plastique qui comporte un moteur et un ventilateur soufflant l'air chaud dans l'habitacle.

Plusieurs gaines de conduite sont prévues et munies de volets qui permettent de diriger l'air chaud vers les pieds des occupants ou vers l'intérieur du pare-brise en cas de dégivrage de ce dernier.

Le moteur entraînant le ventilateur peut être entraîné à des vitesses variables par la manœuvre d'une manette commandant un rhéostat en série avec lui. Si l'on ferme le robinet d'eau chaude et si l'on met en route le ventilateur, c'est l'air extérieur non réchauffé qui vient ventiler l'habitacle.

Sur les moteurs refroidis par l'air, ce sont les ailettes des culasses qui servent de générateurs d'air chaud. Souvent, dans ce cas, ce n'est pas un moteur électrique spécial qui pousse l'air dans les gaines mais le ventilateur du moteur.

Certaines voitures de luxe sont munies d'un bloc réfrigérateur analogue à ceux qui équipent les armoires frigorifiques. On le met en service par temps chaud pour ramener l'air de l'habitacle à une température plus basse que la température extérieure. Les gaines de la ventilation sont souvent les mêmes que celles utilisées pour le chauffage. Ce système, encore assez coûteux, présente de grands avantages et il se généralisera sans doute peu à peu.

2.7.3. Essuie-glace. — Tous sont actuellement motorisés et c'est l'organe qui subit le plus d'améliorations continuelles. En principe, les fabricants livrent toujours un ensemble, adapté pour chaque modèle de voiture, comprenant le moteur, la tringlerie de commande, les porte-balais et les raclettes de caoutchouc (fig. XXIII-17).

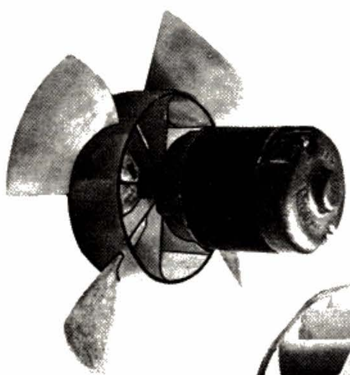


Fig. XXIII-15

Moteur de servitude

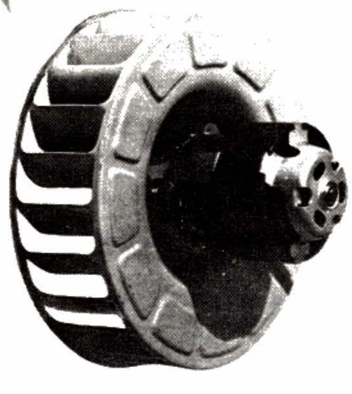


Fig. XXIII-16

Moteur de servitude

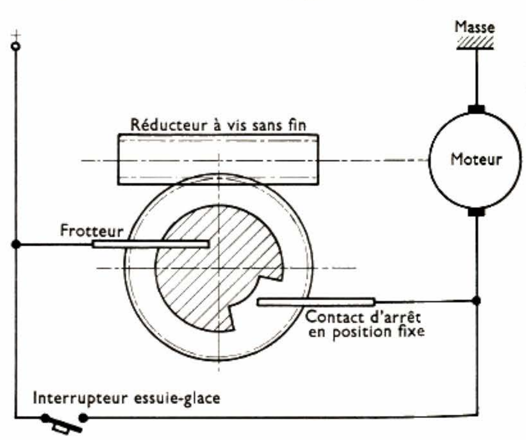


Fig. XXIII-17 — Essuie-glace : principe d'arrêt des raclettes en position fixe

Il y a quelques années, les raclettes d'essuie-glace étaient de petites dimensions et les pare-brise plats. Mais les pare-brise se sont agrandis et courbés pour assurer une meilleure visibilité. Les moteurs entraînant les raclettes sont devenus de plus en plus puissants et tout l'ensemble s'est renforcé. Ces moteurs sont équipés de réducteurs à engrenages, ramenant la vitesse sur l'arbre d'utilisation à environ un tour par seconde. Il existe des réducteurs à engrenages droits nécessitant souvent deux trains de réduction pour obtenir la vitesse désirée. Il est aussi souvent utilisé un système par vis hélicoïdale permettant la réduction souhaitée avec un seul engrenage.

Le moteur est fixé sur une platine rigide supportant deux paliers de sortie d'arbres. Le côté intérieur de ces arbres

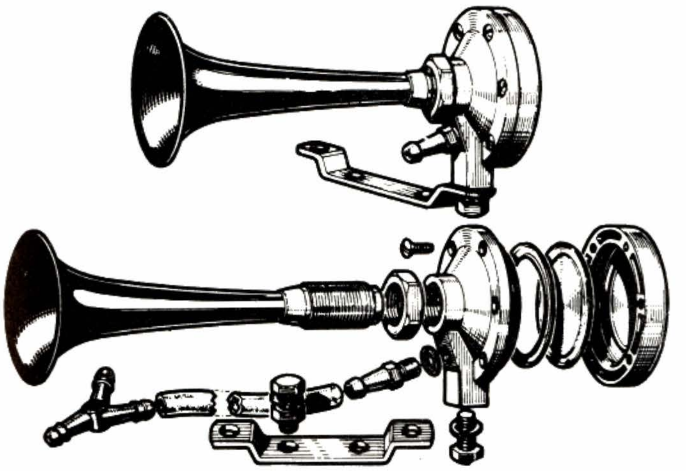


Fig. XXIII-18

Avertisseur à compresseur : les deux trompettes (*S.E.V. Marchal*)

porte un maneton entraîné par une bielle, l'autre extrémité de la bielle est fixée sur un doigt tournant en mouvement oscillant sur l'arbre entraînant les porte-raclettes. Du côté extérieur, ces arbres sont munis d'un tambour à cannelures sur lequel vient s'enclencher le porte-raclette. Les cannelures l'empêchent de tourner et obligent le porte-raclette à suivre le mouvement oscillant de l'arbre.

Les porte-raclettes portent à l'intérieur un ressort et ainsi le levier qui les termine est appliqué avec une force voisine de 0,4 à 0,6 daN. L'extrémité du levier est découpée pour assurer le verrouillage de la raclette lorsqu'elle y est accrochée.

Les raclettes sont des pièces composites formées par une armature articulée pour pouvoir toujours appliquer la pièce essuyeuse en caoutchouc sur la glace, quelle que soit la courbure rencontrée dans le trajet de la raclette. La pièce de caoutchouc est maintenue par une vertèbre métallique très souple qui se fixe sur l'armature articulée. Sur tous les véhicules il est prévu d'arrêter les raclettes toujours à la même position (généralement horizontale pour ne pas gêner la vue du conducteur), quel que soit le moment où l'on coupe l'interrupteur de l'essuie-glace. Cela est obtenu grâce à un interrupteur tournant avec un des engrenages du moteur ; il permet d'appliquer la tension à ce dernier tant qu'il n'est pas parvenu à une position repérée où le courant est définitivement coupé. Il existe des circuits électroniques, se perfectionnant sans cesse, qui mettent en route automatiquement l'essuie-glace dès qu'il pleut, à une cadence variant suivant l'intensité de la pluie.

2.7.4. Divers. — La liste des accessoires mus par des moteurs électriques s'allonge chaque jour. On peut citer les ouvre-toits électriques, la commande automatique d'ouverture ou de fermeture des glaces de portières, les lave-glaces où un moteur minuscule mais robuste entraîne une petite pompe rotative envoyant de l'eau ou un mélange nettoyant sur le pare-brise quand celui-ci est sali par les projections du véhicule précédent. Un système électronique permet même la commande automatique de la pompe et met en route, en même temps, les essuie-glaces en prolongeant leur action après celle de la pompe jusqu'à l'essuyage complet du pare-brise.

2.8. Appareils avertisseurs. — Bien qu'interdits dans les villes, ils sont obligatoires sur route pour avertir les autres usagers de la route à un croisement, lors d'un dépassement ou en cas d'un danger quelconque. Il en existe de trois types.

1° *Avertisseurs manométriques.* — Ils sont très puissants. Ce sont en fait des trompettes devant sonner soit une, soit au moins trois notes successives pour se différencier des véhicules officiels, pompiers, police, ambulances qui donnent des signaux sonores à deux notes. Dans les modèles courants, il n'y a que deux trompettes, mais, par un distributeur tournant, on envoie l'air deux fois dans l'une et une fois dans l'autre, ce qui produit trois notes successives.

L'alimentation en air peut être assurée par la dépression prélevée au niveau du carburateur mais, plus souvent, c'est un compresseur mû par un moteur électrique qui envoie de l'air comprimé dans les trompettes après passage à travers un distributeur tournant qui dirige l'air comprimé à la cadence voulue vers les trompettes (fig. XXIII-18). Dans les modèles de luxe, le distributeur se complique et le nombre de trompettes peut être assez élevé pour jouer la première mesure d'un air connu.

Les trompettes utilisées sont d'un modèle différent des instruments de musique. Une membrane métallique ronde et souple est fixée par son pourtour dans une chambre étanche. En son centre vient s'appliquer l'extrémité tubulaire du cornet acoustique. Lorsqu'on envoie de l'air comprimé dans la chambre, la pression augmente et la membrane s'incurve et se sépare du cornet acoustique dans lequel l'air s'engouffre ; cela fait diminuer la pression, et la membrane élastique vient refermer le tube. Aussitôt la pression croît à nouveau et un deuxième cycle recommence. De la fréquence de ces cycles dépend la note émise qui, tout comme pour un tuyau d'orgue, est influencée par plusieurs facteurs : pression de l'air, épaisseur et diamètre de la membrane, longueur et diamètre du cornet acoustique. Le réglage se fait en ajustant la pression du tube acoustique sur la membrane ; il est très délicat et ne doit pas être modifié.

2° *Avertisseurs vibrants.* — Ils sont basés sur le même principe qu'une sonnerie trembleuse, mais la puissance mise en jeu est plus grande (fig. XXIII-19).

L'appareil comporte un électroaimant. Une extrémité du bobinage est reliée à l'un des contacts placés au centre d'une membrane métallique, tandis que l'autre contact est relié à une borne de la batterie. L'autre extrémité du bobinage est reliée à l'interrupteur commandant l'avertisseur. Au repos, les deux contacts se touchent. Lorsqu'on agit sur l'interrupteur, le courant circule dans l'enroulement en

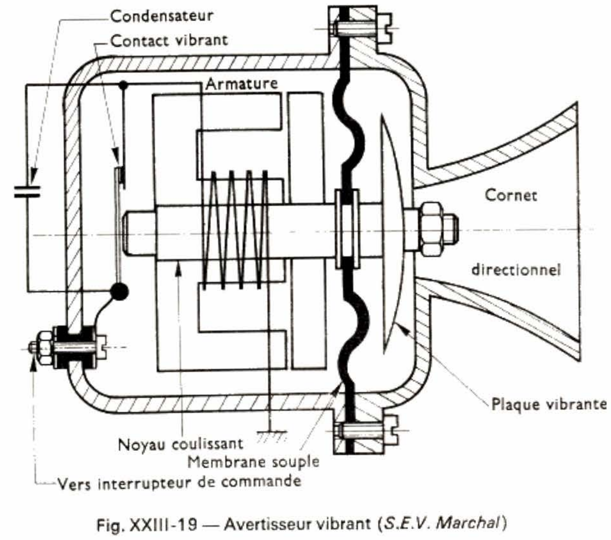


Fig. XXIII-19 — Avertisseur vibrant (*S.E.V. Marchal*)

passant par le contact ; l'électroaimant attire énergiquement la membrane qui se creuse et coupe le courant. La membrane revient donc par élasticité à sa première position et rétablit le contact et ainsi de suite. La fréquence de ces cycles est très élevée et la note émise est assez aiguë. Un cornet acoustique placé devant la membrane renforce et oriente le son. Un condensateur est placé aux bornes des contacts pour atténuer l'action destructrice des étincelles dues aux nombreuses ruptures du circuit.

Le réglage de ces appareils est très délicat, l'amplitude du mouvement de la membrane étant faible. La puissance dépend de celle de l'électroaimant et des dimensions de l'appareil.

3° *Avertisseurs électroniques.* — Des haut-parleurs peuvent servir d'avertisseurs lorsqu'ils sont excités par un circuit électronique. Des amplificateurs basse fréquence à transistors conviennent pour ce travail et, là, il n'y a pas de limite à simuler le son de n'importe quel instrument : trompette, cloche, orgue, sifflet, etc.

2.9. Autres accessoires. — Ce domaine est illimité, et chaque jour un nouvel accessoire vient s'ajouter à ceux existants.

On peut citer les montres à remontage automatique : un électroaimant vibrant entraîne, par un cliquet, une roue à rochet fixée sur le barillet du ressort moteur. Les postes de radio et les lecteurs de bandes magnétiques sont également très répandus.

De nombreux relais sont utilisés pour la commande des phares, des avertisseurs ou d'organes divers, lorsque les interrupteurs de commande — souvent miniaturisés — ne pourraient supporter les courants assez importants mis en jeu.

Des compte-tours sont souvent ajoutés sur certains véhicules pour indiquer le régime du moteur. Certains sont mécaniques : un flexible plonge dans la boîte de vitesses où il est entraîné par l'arbre moteur, ou bien le mouvement est prélevé sur l'arbre de l'allumeur ou de l'arbre à cames, puis envoyé sur un indicateur placé sur le tableau de bord. On utilise aussi des systèmes électriques : les impulsions fournies par le rupteur de l'allumeur, qui sont en synchronisme avec le nombre de tours du moteur, sont envoyées par un conducteur sur un indicateur électrique gradué en nombre de tours par minute.

Les dégivreurs de glace arrière sont formés de fils résistants, collés sur la glace, et qui s'échauffent légèrement lorsqu'ils sont traversés par un courant. On trouve aussi des allume-cigares : petites résistances montées en bout d'un câble souple, qui rougissent lorsqu'elles sont mises sous tension.

Le tableau de bord comporte aussi de nombreux indicateurs pour renseigner le conducteur sur le fonctionnement de son véhicule.

2.9.1. Indicateur de charge. — C'est souvent un ampèremètre rudimentaire mais suffisant pour indiquer au conducteur si la charge de la batterie se fait normalement lorsque le moteur fonctionne. Il est quelquefois constitué par un petit aimant fixé à une aiguille indicatrice, et plongé dans le champ magnétique produit par quelques spires de fil parcourues par le courant qui traverse la batterie. Suivant que l'on charge ou que l'on consomme, le champ s'inverse et l'aiguille indique charge ou décharge.

Sur les véhicules équipés d'une diode d'arrêt, on utilise la chute de tension aux bornes de cette diode lorsque l'alternateur débite pour allumer une lampe indiquant la charge.

Sur d'autres montages, la lampe s'allume au contraire en cas de manque de débit.

2.9.2. Indicateur de niveau d'essence. — Un flotteur situé dans le réservoir entraîne, par un levier, un axe sur lequel est fixé un rhéostat. Suivant la position du curseur sur le rhéostat, le courant varie et fait dévier plus ou moins un petit appareil indicateur de quantité d'essence. Il existe aussi des systèmes pneumatiques, le niveau d'essence comprimant plus ou moins de l'air dans une cavité fermée.

2.9.3. Indicateur de température. — Il peut y en avoir pour la température de l'eau de refroidissement et pour l'huile du carter ; c'est plus souvent la température de l'huile qui est contrôlée. En effet, un échauffement anormal du moteur élève rapidement la température de l'huile et pour éviter la destruction du moteur, le conducteur doit être averti immédiatement de cette anomalie.

L'extrémité sensible d'un thermostat plonge dans l'huile vers le bas du carter ; il est réglé pour établir son contact à une certaine température définie par le constructeur du moteur. Ce contact allume aussitôt une lampe rouge sur le tableau de bord.

2.9.4. Indicateur d'éclairage. — Pour éviter au conducteur d'oublier de passer en « code » lors d'un croisement, une lampe colorée est souvent prévue au tableau de bord. Elle est allumée lorsque les projecteurs sont en service.

2.9.5. Indicateur d'usure des garnitures de freins. Sur les freins à disque, la garniture des mâchoires possède, dans son épaisseur, des brins de métal conducteur reliés à une borne d'une lampe du tableau de bord ; l'autre borne de cette lampe est réunie à la borne de la batterie qui n'est pas à la masse (la borne positive en général).

Tant que l'usure n'a pas réduit l'épaisseur de la garniture qui est isolante, les brins métalliques ne peuvent venir toucher le disque qui est à la masse et la lampe, n'étant pas alimentée, ne s'allume pas.

Il n'en est pas de même lorsque l'usure des garnitures est telle que les brins métalliques sont mis à nu et viennent, lors d'un freinage, établir un contact de masse par le disque. Le circuit de la lampe se ferme alors et elle s'allume. Pour des raisons de sécurité, ce contact s'établit avant l'usure complète des garnitures, donnant le temps à l'automobiliste de faire changer ses garnitures de freins.

Tous les véhicules ne sont pas encore munis de ce dispositif.

2.10. Antiparasitage. — Comme on l'a vu en 1.4, le circuit d'allumage — source importante de parasites radioélectriques — est muni de dispositifs antiparasites. Mais il n'est pas le seul à en produire. Les différents moteurs dont est équipé un véhicule fonctionnent en courant continu et possèdent un collecteur dont les étincelles produisent aussi des parasites. Il en est de même pour les régulateurs vibrants. Même les appareils électroniques n'en sont pas exempts.

À part les modèles destinés à l'armée ou à certains services publics (voitures équipées d'émetteurs-récepteurs), les voitures de tourisme ne sont que sommairement antiparasitées. On se contente de ramener le niveau des parasites à une valeur acceptable.

L'antiparasitage est souvent réalisé à l'aide d'un condensateur à double armature dont l'électrode commune est reliée à la masse, les deux autres armatures étant connectées chacune à l'un des balais du collecteur du moteur intéressé, il est indispensable que les connexions soient très courtes. On ajoute quelquefois en série une petite bobine formée d'un tore ou d'un bâtonnet de ferrite autour duquel sont enroulées deux ou trois spires de fil de cuivre isolé. Dans le cas d'un régulateur vibrant, le condensateur est relié aux contacts où se produisent les étincelles.

CHAPITRE XXIV

ESSAIS DE LA VOITURE AUTOMOBILE

Avant de procéder à la diffusion commerciale d'un nouveau type de voiture, le constructeur procède à de nombreuses séries d'essais.

1. ESSAIS DES ORGANES ET ENSEMBLES

Les moteurs sont éprouvés au banc d'essai. Une première série d'essais a pour but de déterminer les réglages de la distribution, de l'avance à l'allumage et du carburateur, qui donneront les meilleures performances au point de vue puissance et consommation spécifique. Ensuite, il est procédé à des essais d'endurance (au banc) qui durent des centaines d'heures et qui permettent de se rendre compte de la fragilité de certaines pièces ou de leur usure anormale. Chaque défaut qui apparaît est corrigé jusqu'à ce que l'on arrive à un ensemble de qualités : puissance, couple élevé aux bas régimes, silence, sobriété, absence de vibrations, endurance, etc., jugées satisfaisantes.

Des essais analogues sont exécutés avec les autres organes — embrayage, boîte de vitesses, arbres de transmission, pont arrière — ainsi que sur les équipements. On utilise des bancs automatiques qui permettent de répéter les manœuvres et de faire varier les charges et efforts suivant des cycles bien définis.

1.1. Essais du prototype. — Les organes sont ensuite montés sur quelques châssis qui vont constituer les prototypes. Essayeurs et ingénieurs multiplient alors les essais sur route, par tous les temps, dans les circonstances les plus pénibles, à une cadence accélérée, de façon à faire subir au prototype, en quelques mois, un ensemble d'épreuves plus dures que celles que la voiture d'un client subira en plusieurs années. Chaque jour les rapports des essayeurs spécialistes sont analysés et des modifications, souvent très nombreuses et parfois importantes, sont apportées aux dessins originaux.

1.2. Les avant-séries. — Parallèlement, la fabrication est étudiée, les machines-outils sont approvisionnées, transformées, quelquefois créées. Il en est de même des montages, des outillages, des chaînes de fabrication.

Malgré toute l'expérience du bureau des méthodes, la fabrication en série, très différente de la fabrication artisanale des prototypes, demande une longue mise au point qui porte non seulement sur l'usinage des pièces et le montage proprement dit, mais aussi sur le choix des matériaux, le traitement thermique de certaines pièces à la chaîne, le choix des tolérances, etc. Actuellement, entre le début de l'étude d'un nouveau type de voiture et le lancement en fabrication de série il s'écoule quatre à cinq ans pendant lesquels plusieurs millions sont investis en frais d'études, d'essais et d'outillage. Cela explique la répugnance des constructeurs à procéder ensuite à des modifications, peut-être avantageuses en elles-mêmes, mais qui entraînent des dépenses considérables.

Les premières centaines de voitures sorties des chaînes constituent l'avant-série. On procède alors à des essais à grande échelle, parfois avec le concours de la clientèle — les clients-pilotes — dont on suit les réactions et aussi les ennuis de voitures.

Ensuite seulement, on lance la construction en grande série.

2. LES ESSAIS SUR ROUTE

Dans tous les essais de voiture, les essais sur route tiennent une grande place. Ils ont l'avantage de permettre de juger du comportement général du véhicule, ce qui intéresse le client au premier chef.

Nous allons examiner les principaux essais sur route.

2.1. Essais de vitesse. — La vitesse maximale d'un véhicule est une performance caractéristique. Elle est fonction de la puissance du moteur et de la finesse aérodynamique de la carrosserie. La mesure de la vitesse maximale s'effectue sur une base suffisamment longue en palier (de 1 à 3 kilomètres) ; sa longueur est connue avec précision.

Un chronométreur mesure au dixième de seconde près, le temps mis à parcourir la base. Si la base est constituée par une ligne droite — base ouverte — il est nécessaire de la parcourir dans les deux sens de façon à éliminer l'influence du vent. L'essai est réalisé, véhicule lancé, c'est-à-dire que le véhicule aborde la base de mesure à sa vitesse maximale.

2.2. Essais d'accélération. — Les essais d'accélération mettent en évidence les qualités de reprise d'une voiture et permettent de se rendre compte si une voiture est « nerveuse ».

Les possibilités d'accélération dépendent de la puissance du moteur, de la légèreté du véhicule et de la forme de la courbe de puissance.

Les essais peuvent être exécutés en montant à bord de la voiture un accéléromètre enregistreur. Plus souvent, on enregistre l'espace parcouru en fonction du temps. Pour cela on utilise un appareil appelé « cinquième roue » constitué par une roue de bicyclette, liée au véhicule par une attache articulée. Cette roue entraîne un dispositif qui donne une impulsion électrique à chaque fois qu'une certaine distance est parcourue. Ces impulsions sont transmises à un enregistreur.

L'enregistrement se fait en général sur films photographiques mais on utilise de plus en plus les enregistrements sur films magnétiques, autorisant le dépouillement automatique à l'aide de calculateurs.

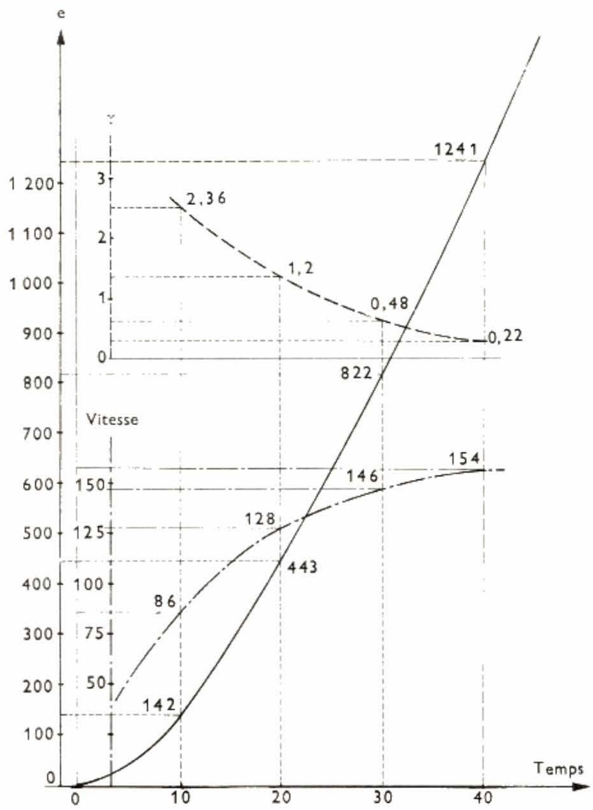


Fig. XXIV-1 — Éléments des courbes caractéristiques des performances d'une berline grand tourisme de 1,7 l (Temps en secondes; vitesse en kilomètres par heure, accélération en mètres par seconde au carré; espace parcouru en mètres) (*UTAC*)

Le temps est enregistré simultanément et le dépouillement permet de tracer les courbes de l'espace parcouru, de la vitesse instantanée et de l'accélération (fig. XXIV-1).

Pour des essais rapides on se contente souvent de mesurer le temps que met la voiture pour faire 400 et 1 000 mètres depuis l'arrêt ou depuis une vitesse stabilisée, faible.

2.3. Essais de consommation. — Ce sont des essais auxquels le client attache beaucoup d'importance. Ils sont très difficiles à exécuter correctement. On distingue l'essai de consommation sur route et l'essai de consommation sur piste appelé aussi essai de consommation à vitesse constante.

L'essai de consommation sur route se fait sur un itinéraire que l'on choisit moyennement encombré et moyennement accidenté. Il importe que l'itinéraire soit assez long — 2 à 300 kilomètres, par exemple — de façon à diminuer l'erreur relative sur la mesure de l'itinéraire généralement connue à 1 kilomètre près. On opère habituellement de plein à plein, c'est-à-dire que l'on part avec le réservoir plein jusqu'à un repère bien visible et la quantité de combustible qu'il faut ajouter à l'arrivée pour remplir le réservoir jusqu'au repère choisi est la quantité consommée. Les essais doivent être plusieurs fois répétés, si possible avec plusieurs conducteurs, tout en imposant une même vitesse moyenne. La consommation est exprimée en litres par 100 kilomètres et il faut toujours préciser à quelle vitesse moyenne. Suivant la façon de conduire et la vitesse moyenne, les consommations peuvent varier du simple au double.

L'essai de consommation sur piste et à vitesse constante a un caractère plus théorique, mais en revanche il élimine l'influence du conducteur, du profil et de l'encombrement de la route.

Le combustible est contenu dans une burette de consommation spéciale qui donne la quantité consommée à 1 cm³ près (fig. XXIV-2). La longueur de la piste est souvent connue avec précision; par exemple, l'anneau de vitesse de l'autodrome de Linas-Montlhéry de 2 500 mètres, est connu à moins d'un mètre près.

Le conducteur parcourt la piste rigoureusement plate en maintenant constante la vitesse du véhicule. La consommation est mesurée au moyen de la burette à niveau visible. Puis l'opération est renouvelée en faisant varier la vitesse de 10 km en 10 km, par exemple. On voit qu'à partir d'une certaine vitesse, la consommation croît relativement vite.

2.4. Essais de freinage. — La recherche de la sécurité entraîne l'amélioration constante de l'efficacité du freinage. Il est donc nécessaire de procéder à des essais de freinage aussi précis que possible.

Les mesures peuvent porter, soit sur la mesure directe de la décélération au moyen de décéléromètres, soit sur la mesure de la distance d'arrêt.

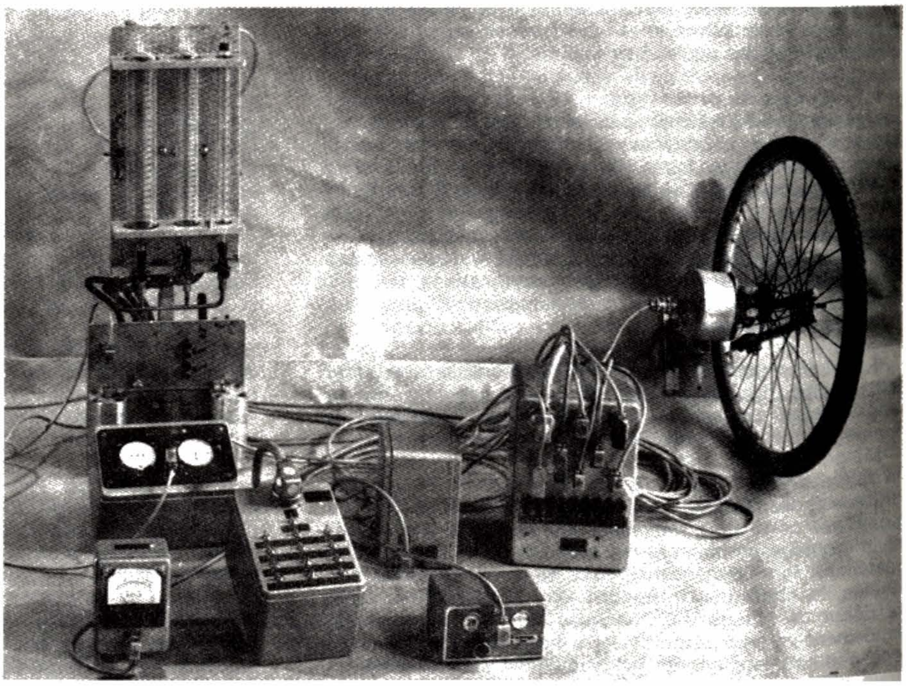


Fig. XXIV-2

Ensemble de mesures pour les consommations d'essence:
- burette à présélection de 3 capacités;
- 5ᵉ roue pour mesure de la distance parcourue et de la vitesse;
- indicateur de vitesse, de distance et de temps;
- enregistreur photographique;
- boîtier de commande

(*UTAC*)

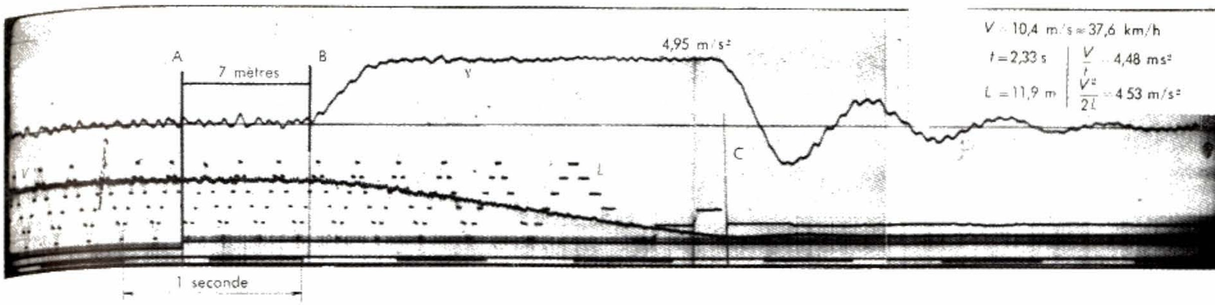


Fig. XXIV-3 — Enregistrement du freinage d'un camion — A : le conducteur reçoit l'ordre de freiner ; AB : temps de réflexe du conducteur ; le véhicule parcourt 7 m avant le début du freinage effectif en B ; C : fin de freinage ; le véhicule est arrêté ; Y : enregistrement de la décélération ; V : enregistrement de la vitesse de la dynamo tachymétrique de la 5e roue ; L : enregistrement de la distance (1 dent = 1 tour de la 5e roue)

La mesure de l'efficacité du freinage au moyen de la distance d'arrêt nécessite de connaître la vitesse exacte du véhicule au moment du coup de frein puisque la distance acceptable est fonction de cette vitesse. On utilise généralement la cinquième roue décrite précédemment.

Le dépouillement de la bande (fig. XXIV-3) permet de connaître le temps de réflexe du conducteur, le temps t de freinage effectif, la distance totale de freinage, réflexe compris, et la distance effective de freinage L (V. chap. 20).

La décélération moyenne γ du mouvement est égale à $\frac{V_0}{t}$ ou $\frac{V_0^2}{2L}$ si V_0 représente la vitesse du véhicule au moment du coup de frein.

2.5. Essais d'endurance. — Les essais d'endurance, qui ont surtout pour but d'examiner le comportement du véhicule et de ses organes mécaniques en utilisation normale, se font sur un très long kilométrage et sur des routes variées : autoroute pour tenue à régime élevé, route ordinaire à vitesse variée, circuit en Afrique pour tenue à la température, à l'humidité, à la poussière, circuit en pays froid, Norvège ou Canada. On n'omet pas les essais de départ à froid, ni les essais de réchauffage de la cabine.

Ces essais se font également sur pistes spéciales ou dans des chambres climatiques reproduisant les différentes conditions souhaitées, ce qui permet une plus grande rapidité dans l'exécution de toutes les possibilités.

Description d'une chambre climatique. — Une chambre climatique ou simulateur de route comporte généralement (fig. XXIV-4 a et b) :

— Un ou deux rouleaux entraînés par les roues motrices de la voiture et pouvant absorber la puissance. Ces rouleaux sont de grand diamètre (1,50 m) afin que la déformation du pneumatique soit aussi proche que possible de sa déformation sur route. Les rouleaux sont lisses mais peuvent recevoir des revêtements qui représentent des routes pavées ou déformées. Dans le cas où chacune des roues motrices entraîne un rouleau, celles-ci peuvent tourner à des vitesses différentes, simulant ainsi le fonctionnement du pont arrière en virage. Les rouleaux sont calés sur un arbre qui entraîne, en général, une machine à courant continu. Cette machine peut fonctionner soit en frein, soit en moteur, ce qui permet d'absorber la puissance développée par le moteur du véhicule (marche en palier et côte) soit de restituer de la puissance au véhicule (marche en descente).

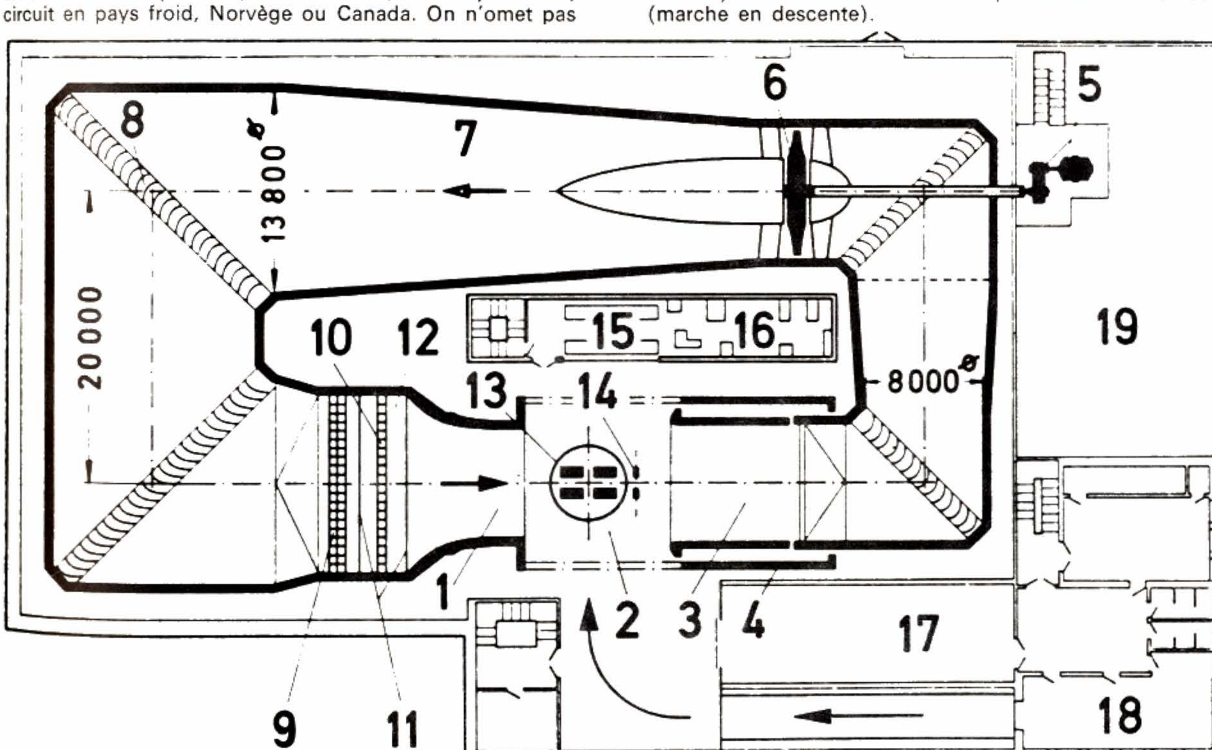


Fig. XXIV-4 a — Schéma de la chambre d'un simulateur de route : 1. tuyère ; 2. section de mesure ; 3. collecteur ; 4. enveloppe mobile de la section de mesure ; 5. moteur d'entraînement électrique avec transmission ; 6. soufflerie axiale ; 7. diffuseur ; 8. coude de renvoi ; 9. refroidisseur d'air ; 10. chambre de tranquillisation ; 11. filtres cellulaires réduisant le niveau de turbulence de l'écoulement ; 12. préchambre de tuyère ; 13. balance aérodynamique à 6 composantes ; 14. banc d'essais à rouleaux ; 15. centrale de commande ; 16. système directeur opérationnel ; 17. atelier de mesures techniques ; 18. bureau ; 19. hall des machines (installation frigorifique)



Fig. XXIV-4 b — Vue intérieure d'un simulateur de route, avec la voiture et les aubages redresseurs du courant d'air en provenance de la soufflerie (*Promo-Phot Service*)

La masse du véhicule peut être représentée par des volants d'inertie entraînés par les rouleaux, ou bien on contrôle électriquement la puissance délivrée par la machine.

— Une soufflerie, qui permet de reproduire la circulation d'air autour de la voiture. La vitesse du vent dans les simulateurs modernes atteint 200 km/h dans une veine de 8 m² et exige des puissances électriques considérables. La vitesse du vent est asservie à celle des rouleaux.

— Un groupe frigorifique qui permet de contrôler la température dans le local d'essai. En effet, le véhicule en essai et la soufflerie tendent à réchauffer considérablement l'air ambiant. Il est donc nécessaire de le refroidir même pour fonctionner en ambiance normale. Les températures de fonctionnement sont en principe comprises entre — 25 °C et 50 °C. Cela nécessite des échangeurs calorifiques de grande capacité et des groupes atteignant plusieurs milliers de frigories.

— Un pupitre de contrôle et de régulation. Toutes les commandes sont regroupées sur un pupitre où, par de simples potentiomètres, il est possible de faire varier les divers paramètres de l'équation générale du mouvement.

Il est donc possible de régler les facteurs simulant la masse, la résistance due à l'air, la résistance due au roulement des pneumatiques, la résistance due à la pente (positive ou négative).

Le simulateur de route permet de reproduire le fonctionnement du véhicule dans toutes les conditions qu'il rencontre normalement. Il facilite donc énormément les essais qui se déroulaient autrefois uniquement sur route, avec toutes les difficultés que cela comporte.

2.6. Essais en côte. — Les essais en côte se font généralement en montagne. Ils permettent de vérifier le bon étagement de la boîte de vitesses et la bonne efficacité du système de refroidissement, celui-ci étant placé dans les plus mauvaises conditions de travail : moteur à pleine charge, faible vitesse d'avancement du véhicule, faible vitesse du ventilateur, mélange carburé trop riche du fait de la diminution de la masse volumique de l'air.

Cet essai de refroidissement peut être fait également par la méthode de la côte artificielle. Pour cela, on attelle la voiture en essai roulant en palier à une remorque dont le mouvement des roues peut être freiné à volonté par un frein magnétique. Par le réglage du courant d'excitation, le pilote peut simuler des pentes de 3 à 30 % aussi longues qu'il le désire.

2.7. Autres essais. — Les véhicules automobiles sont soumis à de nombreux autres essais tels que les essais de suspension, les essais de tenue de route, les essais de dérapage sur des aires spéciales, les essais d'étanchéité et d'insonorisation.

Les essais d'étanchéité s'effectuent soit en faisant passer le véhicule sous des jets d'eau puissants, soit dans des tunnels dont l'air est chargé d'une poussière extrêmement fine, soit encore en obligeant le véhicule à franchir un gué.

Les essais d'insonorisation peuvent porter sur le bruit perçu dans le véhicule aux différentes allures et qui est gênant pour les passagers, ou sur le bruit produit par le passage du véhicule et qui est cause de troubles pour les riverains.

Les mesures de bruits s'effectuent avec un sonomètre qui permet d'apprécier l'intensité du son. Comme deux sons de même intensité, l'un grave, l'autre aigu, causent des gênes différentes, on est amené aujourd'hui à établir les spectres des sons émis par le véhicule, c'est-à-dire à rechercher les fréquences principales.

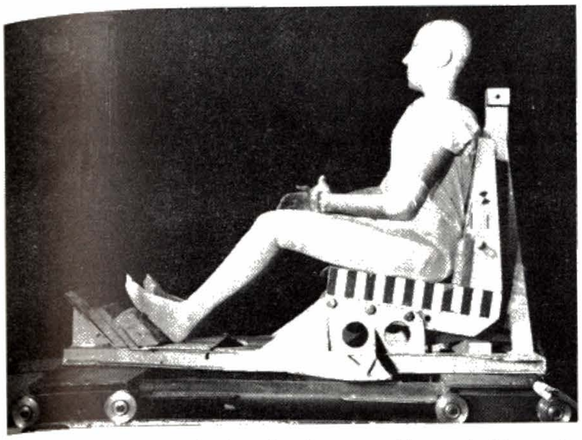


Fig. XXIV-5 — Mannequin d'essai anthropomorphique articulé, avec la répartition de masse, l'amplitude des mouvements, la raideur des articulations et la consistance des muscles identiques à celles d'un être humain (75 kg ; 1,75 m)



t = 0

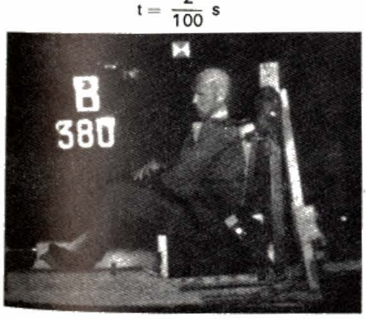
Fig. XXIV-6

Vues extraites d'un film pris à 1 100 images par seconde, lors d'un essai dynamique d'une ceinture de sécurité



$t = \frac{1}{100}$ s

$t = \frac{2}{100}$ s



$t = \frac{3}{100}$ s



$t = \frac{4}{100}$ s



$t = \frac{5}{100}$ s



$t = \frac{6}{100}$ s



$t = \frac{7}{100}$ s



Ces mesures se font, le véhicule roulant sur routes normales ou sur pistes spéciales. Ici encore, l'usage du simulateur de route placé dans une chambre insonorisée permet de travailler dans de meilleures conditions.

3. ESSAIS DE CONFORMITÉ AU CODE DE LA ROUTE

3.1. Essais relatifs à la sécurité. — L'importance de la circulation routière est telle que le nombre des accidents graves augmente sans cesse. Le législateur a donc recherché les causes susceptibles de faire baisser ce nombre et impose aux constructeurs des règles très strictes qui doivent limiter la gravité des accidents :

3.1.1. Ancrages pour ceintures de sécurité. — La ceinture de sécurité est considérée actuellement comme un des moyens les plus efficaces pour protéger, aussi bien le conducteur que les passagers, en cas de collision. Elle a d'ailleurs été rendue obligatoire dans tous les véhicules.

La ceinture est soumise à des tests sévères avant d'être homologuée. Le plus important est un essai dynamique : il consiste à s'assurer que la ceinture est efficace au cours d'un choc à 50 km/h, avec une décélération voisine de 30 g (g désignant l'accélération terrestre : $g = 9,81$ m/s^2). Un mannequin étudié (fig. XXIV-5 et XXIV-6) pour qu'il ait les mêmes déplacements qu'un être vivant, est attaché sur le siège du conducteur avec la ceinture de sécurité expérimentée. Au moment du choc, l'effort transmis par le mannequin au point d'ancrage sur la structure du véhicule est voisine de 4 000 daN (V. fig. XXIV-7).

Pour permettre une pose facile des ceintures, les carrosseries sont actuellement munies d'ancrages pour ceintures à toutes les places assises du véhicule. Ces points d'ancrage solidement fixés à la structure du véhicule sont soumis en cours d'essais à des efforts représentant la traction de la ceinture (V. fig. XXIV-8). Au total, pour les trois places d'une banquette, c'est une force de 8 000 daN environ qui est appliquée simultanément sur les ancrages correspondants. Sous cette force, le plancher de l'habitacle ne doit être ni déchiré, ni déformé de manière trop importante.

3.1.2. Collision frontale. — Le véhicule, complètement terminé et muni de tous ses équipements, est propulsé à une vitesse de 50 km/h contre un mur de béton d'une masse de 90 tonnes au moins et considéré comme indéformable (V. fig. XXIV-9). Divers moyens de propulsion sont utilisés :

1° *Téléguidage par fil ou radio.* — Dans ce cas, la propulsion du véhicule est assurée par son propre moteur et le guidage du véhicule en essai est effectué depuis un

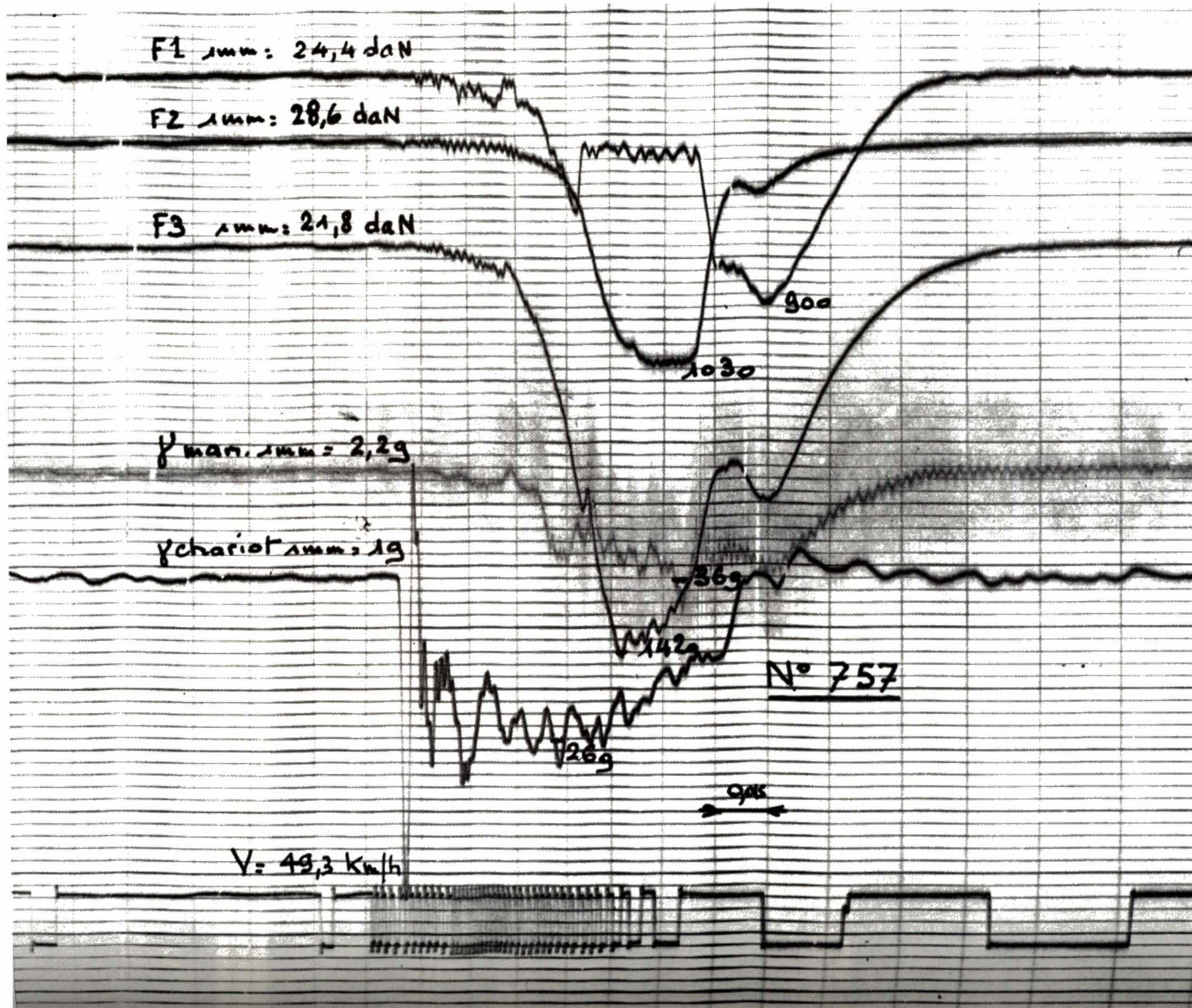


Fig. XXIV-7

Essais d'une ceinture de sécurité
L'enregistrement montre de bas en haut : la vitesse du chariot et l'espace parcouru, l'accélération du chariot, l'accélération du mannequin, les efforts sur chaque brin de la ceinture

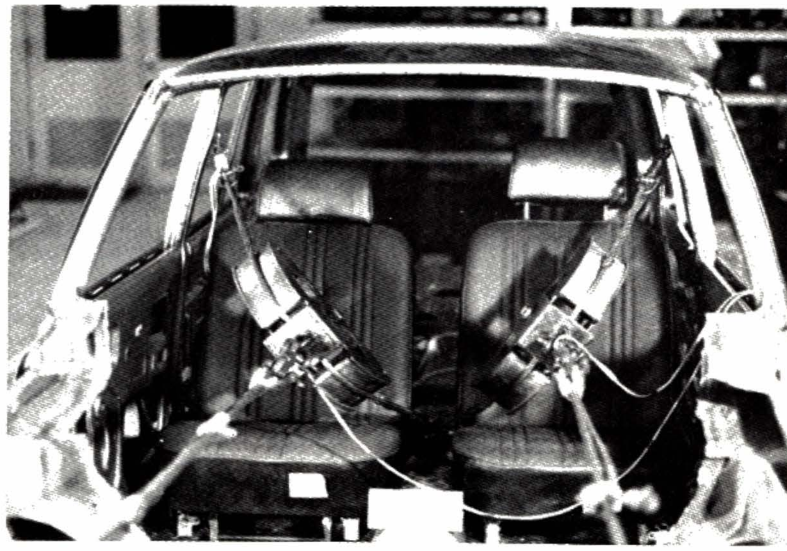
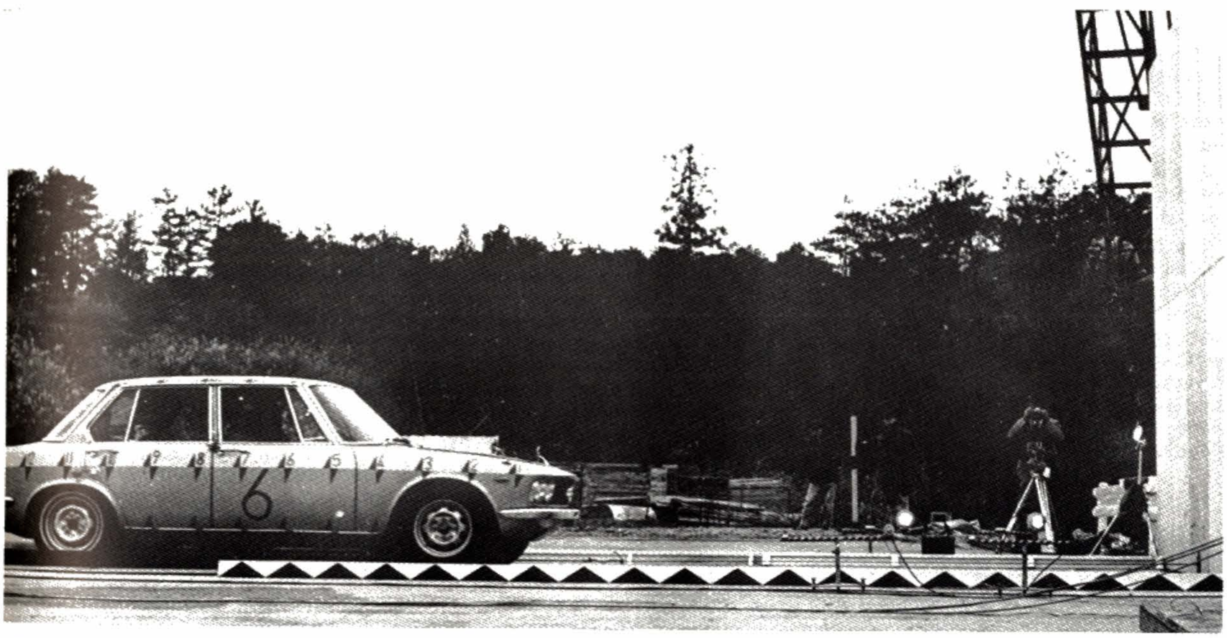


Fig. XXIV-8

Dispositif d'essais pour ancrages de ceintures de sécurité

Fig. XXIV-9 — Le véhicule en essai heurte un mur en béton d'au moins 90 tonnes, à une vitesse de 50 km/h; dans ces conditions le volant ne doit pas pénétrer de plus de 12,7 cm dans l'habitacle



véhicule suiveur avec une liaison par fil ou radio. Le système par radio est surtout avantageux pour réaliser des essais de retournement ou des essais de chocs, voiture contre voiture.

2° *Téléguidage par rail.* — Le véhicule est guidé par un rail noyé dans le sol. Il est tiré par une source de puissance extérieure : deux petits câbles relient le train avant du véhicule à un chariot tracteur, très bas et placé sur le rail directeur. À ce chariot est accroché un câble dont l'autre extrémité est fixée, soit à un véhicule tracteur extérieur au rail, soit à un treuil électrique ou autre. Ce dernier procédé est meilleur car il est plus facile de régler la vitesse avec un treuil qu'avec un véhicule tracteur. Ainsi les essais peuvent-ils être reproductibles.

Quand le véhicule est lancé et quelques mètres avant d'arriver sur le mur, le chariot s'arrête et son câble se décroche ; le véhicule heurte alors la barrière, libre de toute entrave.

La vitesse du véhicule en essai est mesurée à l'aide d'un chronomètre électrique, déclenché par le passage de la voiture sur des contacts électriques. Dans le cas où la vitesse souhaitée pour l'essai n'est pas atteinte, un dispositif d'arrêt d'urgence est prévu.

Cet essai a pour but de vérifier la tenue générale du véhicule au cours d'une collision et plus particulièrement de vérifier que la colonne de direction ne pénètre pas dans l'habitacle d'une façon très importante (fig. XXIV-10). Cet

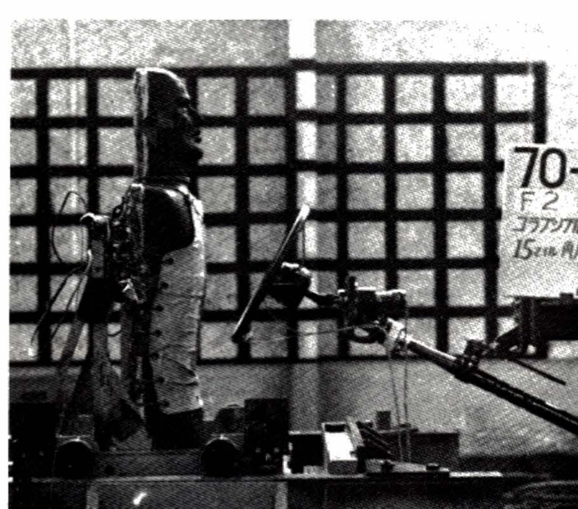


Fig. XXIV-10 — L'effort transmis par le volant au mannequin doit être inférieur à 1 134 daN, lorsque celui-ci le heurte à une vitesse de 24,1 km/h

essai permet également de mesurer les accélération, vitesse et déformation à différents emplacements de la carrosserie et de l'habitacle. On peut ensuite définir avec plus de précision le meilleur moyen d'absorber l'énergie de choc afin que les passagers soient protégés très efficacement.

Ces nouvelles mesures sont effectuées au moyen d'un accéléromètre électrique solidaire de la partie dont on veut mesurer l'accélération. Le signal est transmis à un enregistreur, le plus souvent magnétique soit par fil, soit par radio. Les déplacements et déformations sont en général obtenus par cinématographie. Pour cela, des repères sont collés aux différents endroits de la carrosserie à étudier et à des distances bien connues.

La collision est filmée avec des caméras à prise de vue rapide — 1 000 à 1 500 images par seconde — placées au sol à différents endroits de manière à voir l'ensemble de la collision. On place également des repères et des caméras à l'intérieur de la carrosserie pour étudier le déplacement des éléments invisibles de l'extérieur tels que le pédalier ou la colonne de direction.

Ces enregistrements sont ensuite transformés en données numériques à l'aide de tables de dépouillement spéciales. On traite ensuite les résultats à l'ordinateur.

Cet essai de collision frontale est complété par des essais de choc arrière qui permettent de s'assurer tout particulièrement du bon emplacement du réservoir d'essence et de sa solidité. On provoque également des chocs latéraux pour s'assurer de la tenue des portières, des serrures et des charnières. Le retournement est également étudié.

Ces essais sur des voitures complètes sont en général précédés d'études et d'essais sur des éléments de carrosserie afin de contrôler les sous-ensembles séparément.

Les planches de bord et le pare-brise sont tout particulièrement étudiés. En effet, en cas de collision les passagers sont projetés en avant et viennent heurter violemment ces éléments. On va donc chercher les formes et les matériaux pour que le maximum d'énergie soit absorbé et que les forces soient étalées dans le temps. Ces essais se font au moyen d'un pendule qui vient heurter la planche de bord à une vitesse déterminée (fig. XXIV-11). L'enregistrement des accélérations et des enfoncements permet d'établir la quantité d'énergie absorbée.



Fig. XXIV-11 — L'accélération subie par la fausse tête doit être inférieure à 80 g pendant 3 millisecondes

3.1.3. Essais de pare-brise. — Pour étudier les pare-brise, on projette sur eux divers projectiles, représentant gravillons, volatiles ou tête du passager (fig. XXIV-12).

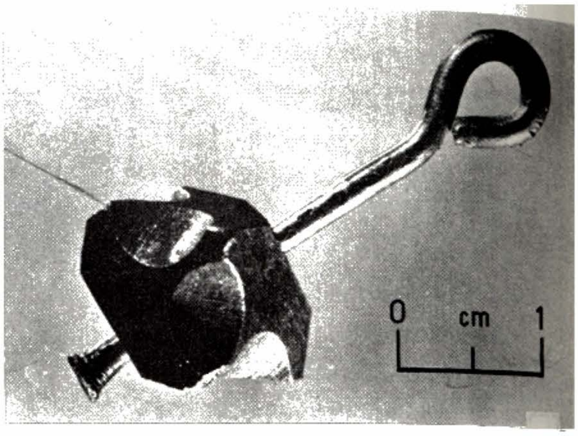


Fig. XXIV-12 — « Gravillon » d'acier trempé utilisé pour le bris du vitrage (*UTAC*)

Les résultats obtenus permettent de s'assurer que, d'une part, les blessures provoquées par le bris du verre seront aussi faibles que possible et que, d'autre part, dans le cas où le véhicule doit continuer à rouler, le conducteur gardera une visibilité suffisante.

Les glaces latérales sont également vérifiées pour qu'en cas de bris, les morceaux ne soient pas dangereux.

3.1.4. Essais de sièges. — Les sièges sont eux aussi soumis à de nombreux essais, notamment à des essais d'endurance pour s'assurer que les garnitures et ressorts ont une résistance suffisante à l'abrasion et aux vibrations.

Pour réaliser cette vérification on positionne sur le siège une masse représentant le passager et on le fait vibrer pendant 1 000 000 de cycles. Par ailleurs on s'assure que les ancrages des sièges sont suffisamment robustes pour qu'au cours d'une collision, ceux-ci ne puissent venir écraser le passager. On n'oublie pas non plus de vérifier le capitonnage des dossiers qui doit être suffisant pour ne pas blesser le passager qui s'y heurterait en cas de collision. De même l'appuie-tête et le dossier doivent résister au poids de la tête et du dos lorsque le corps est projeté en arrière à la suite d'un télescopage.

3.2. Essais relatifs à la pollution atmosphérique. Les moteurs, à essence ou Diesel, sont en partie responsables de la pollution atmosphérique dans les villes. Les véhicules sont donc soumis à des essais afin de s'assurer que les quantités de polluants émis sont inférieures au maximum permis par les règlements.

3.2.1. Véhicules à moteur à essence. — Le véhicule en essais est placé sur un banc dynamométrique à rouleaux (fig. XXIV-13). Celui-ci aura été au préalable réglé de manière que la puissance absorbée à 50 km/h soit identique à celle que le véhicule nécessite quand il roule en palier et à vitesse stabilisée.

Un volant à inertie entraîné par les rouleaux simule la masse du véhicule de manière que les accélérations et décélérations du véhicule soient identiques à celles obtenues sur route.

Le véhicule dont les roues motrices entraînent les rouleaux du banc, est alors conduit de telle sorte que sa vitesse soit celle imposée par le cycle d'essais. Ce cycle d'essais traduit d'une manière synthétique la circulation urbaine (V. fig. XXIV-14).

Pendant l'essai, le gaz d'échappement émis est recueilli dans un sac d'un volume approximatif de 6 m^3. Ce sac est en matériau imperméable aux gaz à étudier. En fin de cycle, le volume du gaz contenu dans le sac est mesuré et les teneurs en oxyde de carbone, gaz carbonique et hydrocarbures imbrûlés sont analysées à l'aide d'analyseurs de gaz.

Les analyseurs de gaz sont en général des analyseurs de gaz à infrarouge. Dans ces appareils, le gaz à analyser est

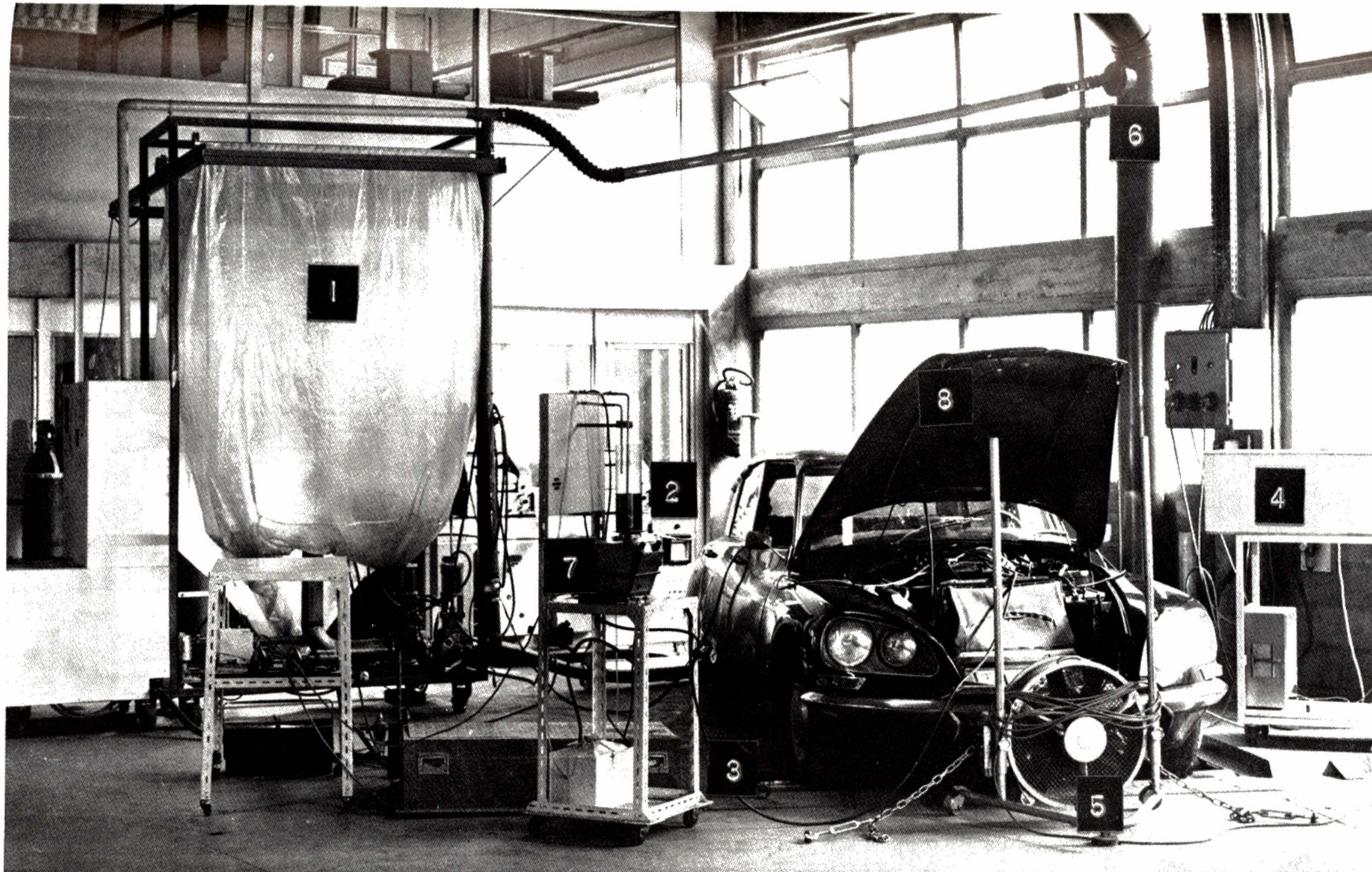


Fig. XXIV-13

1. Ensemble de récupération des gaz d'échappement
2. Baie d'analyses : oxyde de carbone, gaz carbonique, hydrocarbures
3. Banc à rouleaux
4. Suiveur de cycles
5. Ventilateur auxiliaire de refroidissement
6. Cheminée d'extraction des gaz d'échappement
7. Système de mesure de la consommation de l'essence
8. Véhicule d'essai

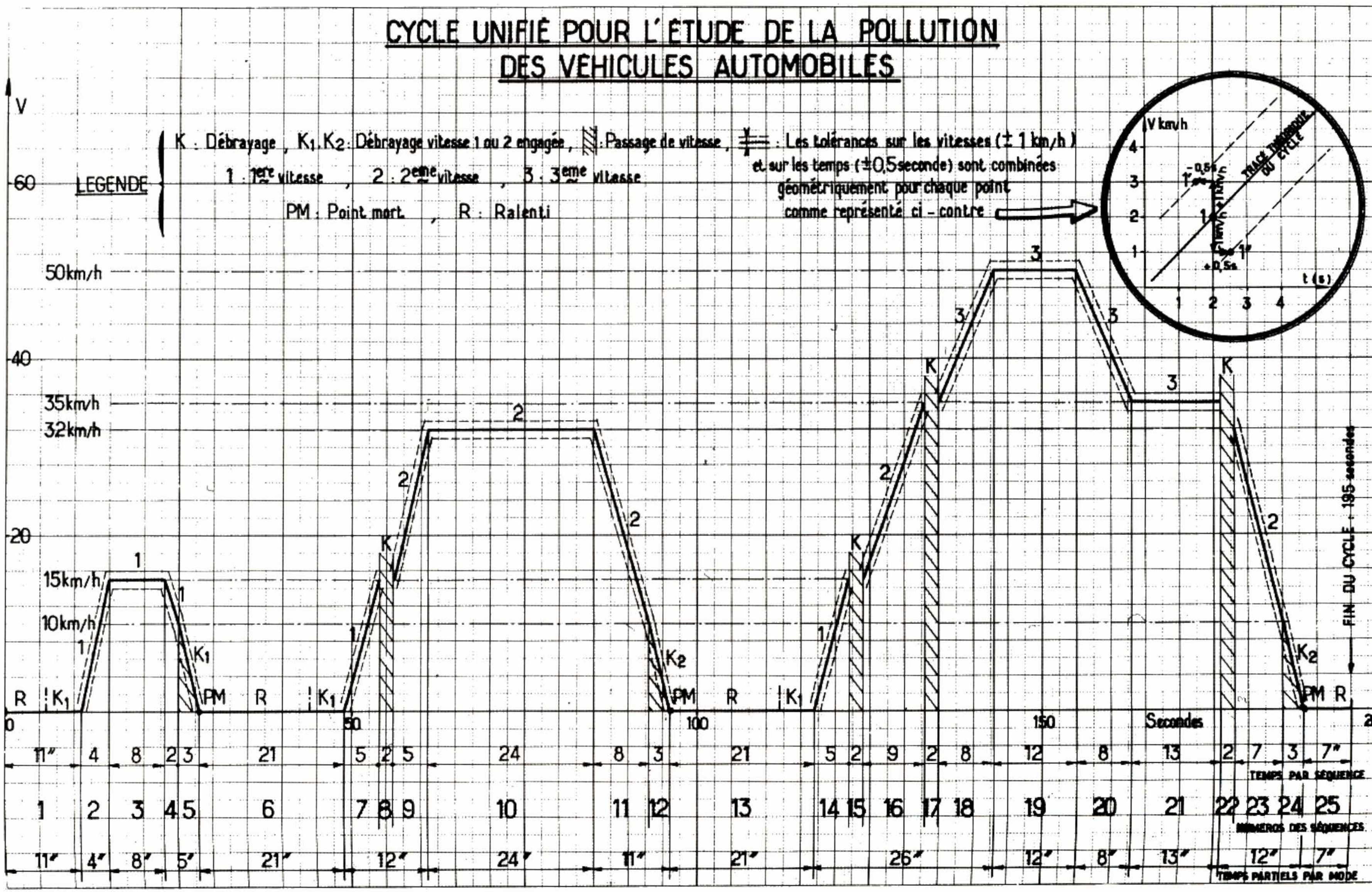


Fig. XXIV-14

On exprime la vitesse V en kilomètres par heure et les temps en secondes.

envoyé après dépoussiérage et séchage dans une cellule de mesure traversée par un rayonnement infrarouge. Une deuxième cellule dite de référence est également traversée par un rayonnement identique de même intensité. Ces deux flux sont reçus sur un détecteur sensible composé également de deux enceintes dont l'une est emplie du gaz à analyser.

Le gaz contenu dans la cellule de mesure absorbant une partie du rayonnement infrarouge, proportionnellement à la teneur du gaz à analyser, les deux enceintes reçoivent donc une quantité d'infrarouge différente et il s'ensuit un déséquilibre des températures engendrant un déséquilibre des pressions qui est détecté et mesuré.

Résultats d'essais

Cylindrée en centimètres cubes	Masse en kilogrammes	CO (1) Pourcentage	HC (1) p.p.m.	Volume de gaz en litres	CO (1) Masse en grammes	HC (1) Masse en grammes	CO (1) Pourcentage au ralenti
845	750	2,8	675	2 550	89	6,6	3,7
1 289	900	2,1	270	4 125	108	4,2	3,1

(1) HC : hydrocarbure ; CO : oxyde de carbone ; p.p.m. : parties par million.

Avant l'arrêt du véhicule, et aussitôt après le cycle, les teneurs en oxyde de carbone sont relevées au régime de ralenti.

Par ailleurs, il est vérifié que les gaz de carter qui sortent normalement du moteur par le « reniflard » sont récupérés et qu'ils ne peuvent s'échapper dans l'atmosphère.

3.2.2. Véhicule à moteur Diesel. — Les moteurs Diesel n'émettent que peu de gaz toxiques mais, en revanche, ils peuvent émettre des fumées noires composées essentiellement de suie.

Ces fumées sont mesurées à l'aide d'un fumimètre pendant les essais au banc du moteur. Elles sont également mesurées au cours d'accélérations à vide sur le véhicule.

Les fumimètres généralement utilisés sont des fumimètres à absorption lumineuse. Ils sont constitués par une chambre à fumée dans laquelle le gaz d'échappement est introduit le plus souvent par l'intermédiaire d'un by-pass (fig. XXIV-15 a et b). Avant de pénétrer dans la chambre, les gaz passent par un condenseur et un régulateur de pression.

À l'une des extrémités de la chambre de fumée est placée une lampe qui émet une lumière dont la température de couleur est comprise entre 2 800 et 3 200 K. À l'autre extrémité et en face de la lampe, on place une cellule photoélectrique qui permet de mesurer la quantité de lumière qui traverse la fumée. Le flux lumineux Φ reçu sur la cellule en présence de fumée par rapport au flux Φ_0 reçu sur la cellule sans fumée, permet de déterminer le coefficient d'absorption lumineux K de la fumée par la loi de Beer Lambert :

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = e^{-KL}$$

(L étant la distance qui sépare la lampe de la cellule).

3.3. Essais d'équipements

3.3.1. Avertisseurs sonores. — Pour que ces appareils soient suffisamment efficaces, il est nécessaire que l'énergie acoustique maximale émise soit comprise dans la gamme de fréquences s'étendant de 1 800 à 3 500 Hz, cela afin de se distinguer des bruits de fond à l'intérieur des véhicules à prévenir, bruits de fond dont l'énergie est surtout dominante dans les fréquences basses du spectre audible.

Les essais consistent donc à mesurer avec un sonomètre, et à analyser avec un système de filtres appropriés, le niveau de pression acoustique et la répartition spectrale de l'énergie émise en fonction de la fréquence.

Ces mesures acoustiques sont complétées par un essai d'endurance pendant lequel l'avertisseur est utilisé pour un certain nombre de manœuvres.

Ces appareils doivent être agréés par le Ministre de l'Équipement.

3.3.2. Silencieux de remplacement. — Ces dispositifs plus généralement désignés par l'expression « pot d'échappement » sont également soumis à l'homologation.

L'essai consiste à comparer le silencieux de rechange et l'appareil qui équipait le véhicule soumis au Service des mines pour agrément.

L'essai est fait en plaçant un émetteur acoustique de bruit blanc à l'entrée du silencieux et en mesurant le niveau résiduel à la sortie de l'appareil. L'affaiblissement obtenu doit être au moins égal à celui donné par le silencieux d'origine.

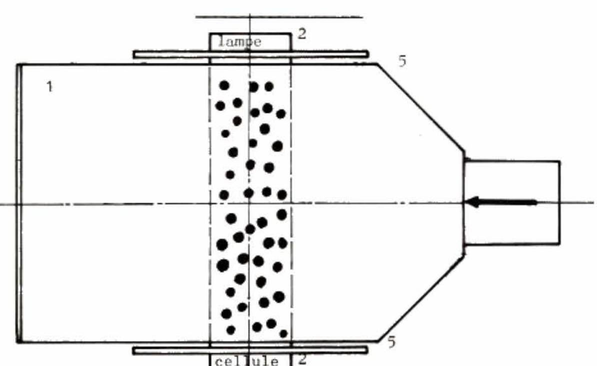


Fig. XXIV-15 a

Principe de la mesure

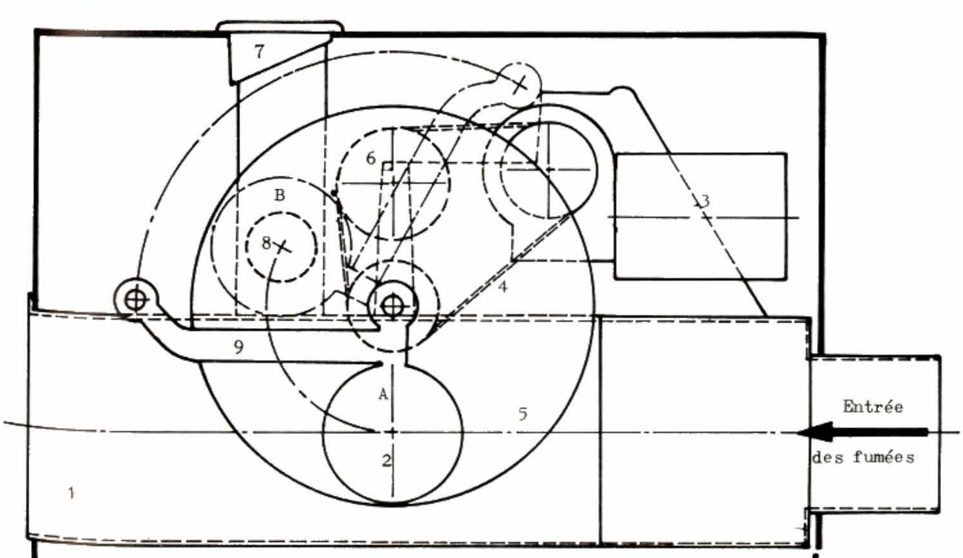


Fig. XXIV-15 b

Schéma de fumimètre (ou opacimètre) (*UTAC*)
1. Boîte à fumée
2. Système optique
3. Moteur
4. Chaîne d'entraînement
5. Vitre mobile autour d'un axe
6. Frotteur
7. Guide de filtrage
8. Filtre d'étalonnage
9. Bras pivotant du système optique

En cas de contestation, une mesure comparative avec le dispositif d'origine est faite sur le véhicule auquel est destiné ce silencieux de remplacement.

3.3.3. Dispositifs antiparasites. — Les systèmes d'allumage électrique des moteurs à allumage commandé doivent être antiparasités afin de ne pas perturber les réceptions de télévision et de radiodiffusion en modulation de fréquence.

La mesure de l'efficacité des dispositifs antiparasites est faite dans un espace dégagé et exempt de perturbation dans les gammes de fréquences à explorer.

Le véhicule est stationnaire et le moteur tourne à un régime constant. Une antenne de mesure est placée à 3 m au-dessus du sol et à 10 m de part et d'autre du compartiment moteur du véhicule dans une direction perpendiculaire à l'axe longitudinal médian de celui-ci.

L'antenne est placée successivement en polarisation horizontale puis verticale. Elle est accordée sur la longueur d'onde correspondant à chaque point de mesure.

Le signal recueilli est mesuré à l'aide d'un récepteur de champ étalonné, ayant une largeur de bande passante et une constante de temps parfaitement définies. Le signal exprimé en microvolts par mètre doit être inférieur en chaque point aux limites prescrites par les arrêtés en vigueur.

3.3.4. Appareils d'éclairage et de signalisation

1° *Projecteurs.* — La répartition du flux lumineux des projecteurs montés à l'avant des véhicules est vérifiée sur un écran simulant la perspective d'une route (fig. XXIV-16). Sur cet écran sont disposés des points et des zones de mesure en chacun desquels les prescriptions des cahiers des charges doivent être satisfaites. Les mesures sont faites en lumière blanche, un contrôle de la couleur est fait ensuite pour les éléments colorant jaune sélectif. Les projecteurs contrôlés actuellement sont de trois types :

— feux-croisement asymétriques pour la circulation, soit à droite, soit à gauche ;

— feux-route (parfois appelés également « longue portée ») ;

— feux-brouillard (parfois appelés également « anti-brouillard »).

Les projecteurs qui émettent à la fois un faisceau route et un faisceau croisement sont appelés projecteurs mixtes.

2° *Feux de signalisation.* — Les feux de signalisation sont les suivants : feu-marche arrière, feu-indicateur de direction, feu-signal de détresse, feu-stop, feu-position avant, feu-position arrière, feu-arrière brouillard, feu-stationnement, feu-encombrement.

Tous les feux de signalisation sont contrôlés en intensité lumineuse et en colorimétrie (fig. XXIV-17). L'intensité lumineuse est mesurée dans un champ horizontal de 125° et dans un champ vertical de 30°.

3° *Catadioptres et dispositif rétro-réfléchissant.* — La grandeur photométrique qui caractérise les catadioptres est le coefficient d'intensité lumineuse (C.I.L.). Le C.I.L. est le quotient de l'intensité lumineuse réfléchie dans la direction considérée par l'éclairement du dispositif catadioptrique, pour des angles d'éclairage et de divergence déterminés (l'angle de divergence est l'angle entre les droites joignant le centre du système catadioptrique au centre du récepteur et au centre de la source d'éclairage).

Le contrôle des éléments catadioptriques est effectué en outre pour les triangles de présignalisation. Le centre de ces dispositifs est constitué par un élément recouvert d'une substance fluorescente dont les caractéristiques photométriques sont également contrôlées.

4° *Dispositif d'éclairage de la plaque arrière d'immatriculation.* — La luminance et les quotients de luminance produits par les dispositifs d'éclairage de plaque arrière sont mesurés pour différents points spécifiés au moyen d'un téléluminancemètre sur une surface blanche diffusante recouvrant l'emplacement réservé à la plaque d'immatriculation.

4. OPTIQUES DES VITRAGES

La déformation des images introduite par la présence du pare-brise est contrôlée par des méthodes de projection de mires ou interférométriques (par exemple, interférométrie holographique).

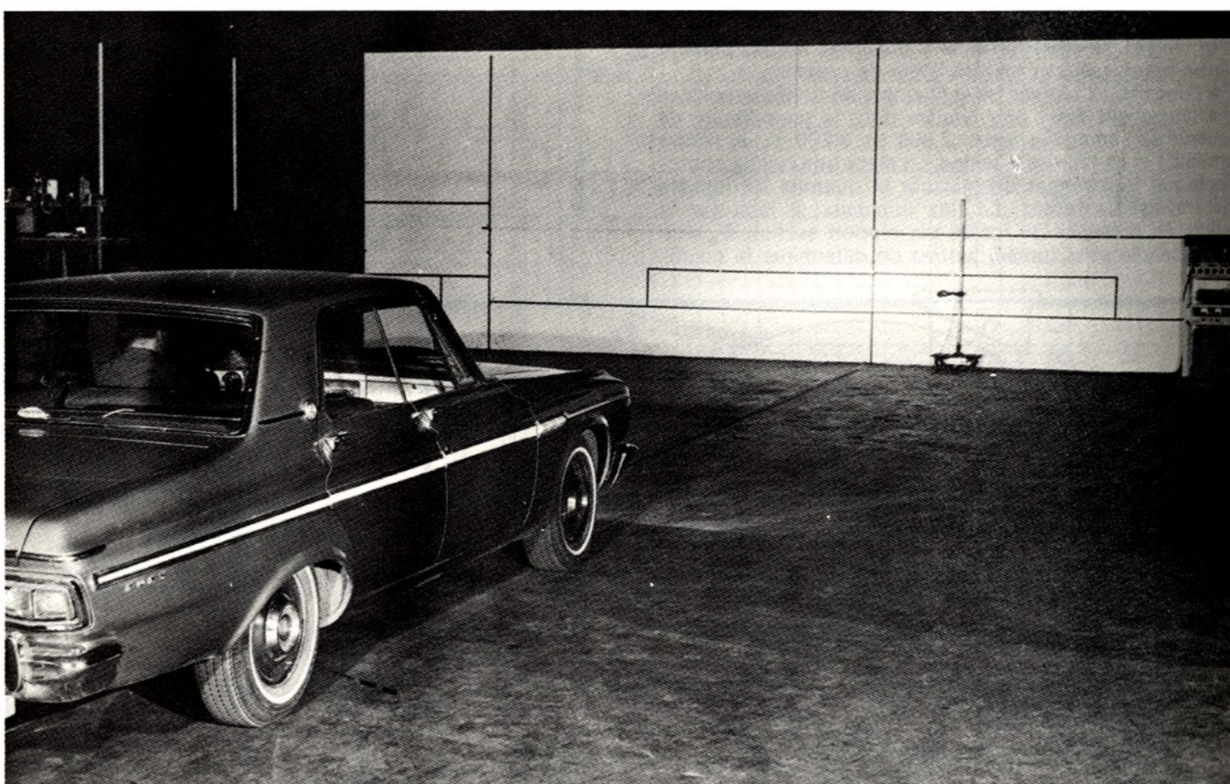


Fig. XXIV-16 — Salle de photométrie de 60 mètres : contrôle général de l'équipement d'éclairage et de signalisation monté sur véhicules (*UTAC*)

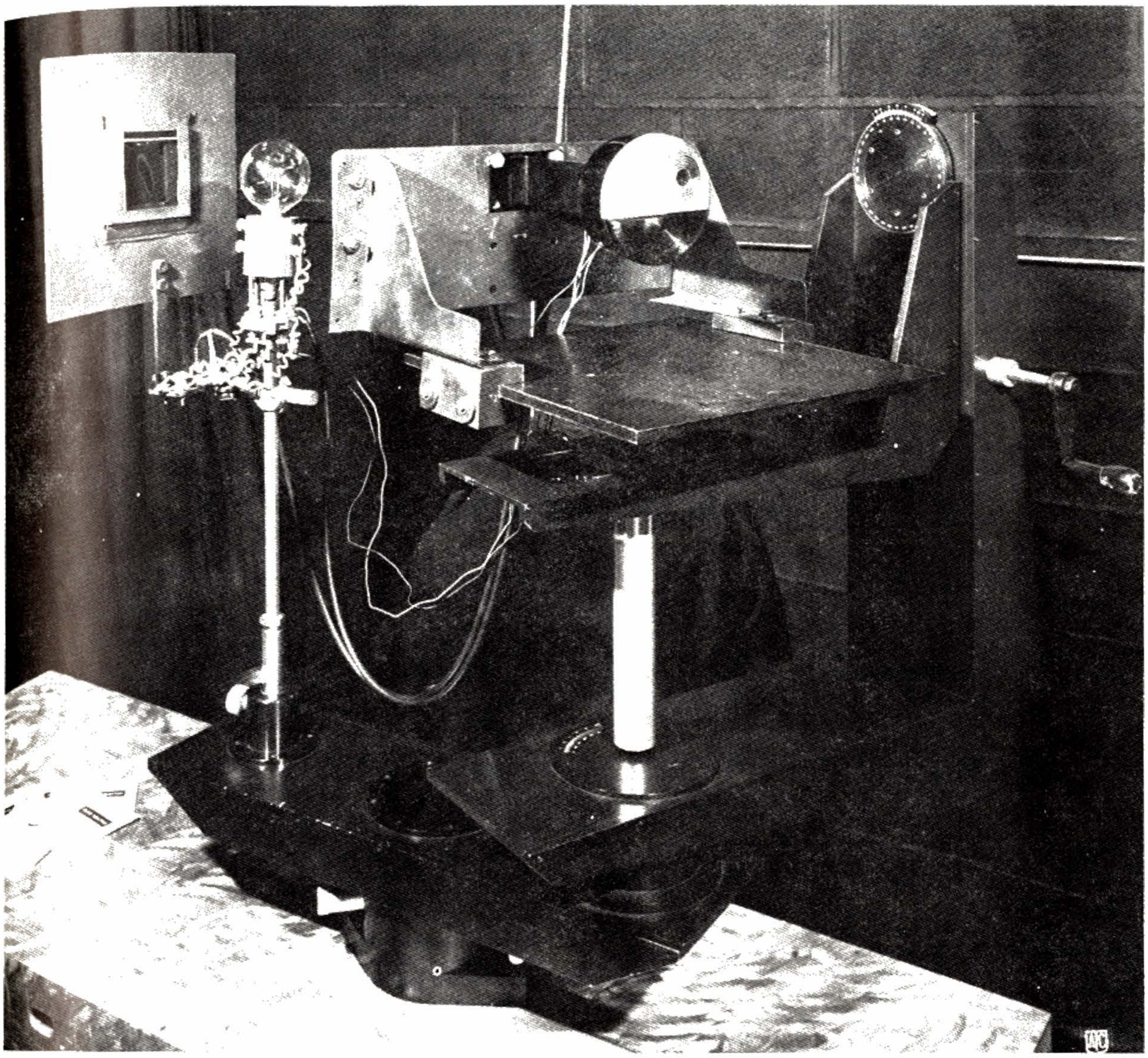


Fig. XXIV-17 — Salle de mesure de l'intensité lumineuse des feux de signalisation : feu monté sur support goniomètre pour la mesure de l'intensité lumineuse dans toutes les directions par comparaison à l'intensité d'une lampe étalon (*UTAC*)

LES VÉHICULES AUTOMOBILES SPÉCIAUX

CHAPITRE XXV

LES VÉHICULES INDUSTRIELS

1. GÉNÉRALITÉS

Les transports routiers ont pris une importance considérable dans l'économie de tous les pays. Souvent opposés au rail pour des raisons diverses, économiques et politiques, ils doivent cependant être considérés comme complémentaires et il est aussi impensable actuellement d'envisager la disparition des transports par voie ferrée que de ceux réalisés par route. Au XXe siècle les transports par route ont apporté une révolution dans la vie quotidienne comparable à celle provoquée par les transports par fer au XIXe siècle.

Les moyens de transporter les charges s'amélioreront encore comme cela s'est déjà produit depuis les origines des transports routiers. Depuis les premiers camions équipés de roues à bandage plein, portant 1 tonne ou 1,5 tonne à 20 ou 25 km/h dans un bruit impressionnant, jusqu'aux véhicules routiers articulés de 35 à 38 tonnes transportant à 80 km/h des conteneurs à travers le monde, l'évolution est considérable. Elle sera peut-être aussi importante dans les prochaines décennies, non pour les charges totales roulantes mais dans la perfection des moteurs, des transmissions, en un mot de la technique, pour améliorer le prix de revient kilométrique, le confort du conducteur, et la sécurité.

Quoi qu'il en soit, il n'existe plus d'entreprise, quelle que soit son importance, de la grosse usine au modeste atelier, qui n'ait besoin d'un véhicule de transport automobile. Qu'il s'agisse de transporter une poche de coulée d'acier en fusion de 20 ou 30 tonnes ou d'un bouquet de fleurs, du camion à la camionnette, tous les véhicules participent à la vie d'un pays et aident puissamment au développement de son économie générale.

Pour situer l'importance du transport routier, il est intéressant de comparer les chiffres du parc des principaux pays industriels en juin 1972.

Pays	Véhicules industriels	Cars et autobus
France	2 050 250	49 250
Grande-Bretagne	1 618 100	78 000
Allemagne Fédérale	1 190 809	50 972
Italie	935 000	40 000
U.R.S.S. (1.1.71)	3 700 000	55 000
Japon	9 280 192	194 360
États-Unis d'Am. (1971)	18 748 421	379 021

1.1. Production des véhicules routiers. — Dans chaque pays la production des véhicules routiers est un élément important de la construction automobile. En France, en 1973, la production totale de véhicules de transport a atteint 393 789 qui se décomposent :

338 829 camionnettes jusqu'à 4 tonnes
10 139 camions légers jusqu'à 6 tonnes
14 842 camions moyens jusqu'à 15 tonnes
12 182 camions lourds jusqu'à 20 tonnes
2 550 camions lourds de plus de 20 tonnes
11 651 tracteurs routiers
3 596 cars et autocars

1.2. Industrie de la carrosserie. — Une particularité propre à l'industrie du véhicule à usage commercial est le développement parallèle de l'industrie de la carrosserie, au moins en ce qui concerne les véhicules de plus de 6 tonnes de masse totale remorquée.

En effet, jusqu'à ce tonnage, les véhicules sont livrés en quasi-totalité avec des carrosseries réalisées en grande série chez le constructeur. Au-dessus de 6 tonnes, le pourcentage de carrosseries réalisées à la demande du client va en augmentant pour atteindre 100 % dans les gros tonnages. Deux raisons expliquent ces choix : la première est que l'utilisateur souhaite une carrosserie répondant au mieux à ses besoins et en conséquence la fait réaliser par un carrossier de son choix (souvent proche de son lieu d'exploitation), la seconde est que le constructeur est mieux placé pour réaliser des carrosseries en grande qu'en petite série, qui dans ce dernier cas serait d'une réalisation trop onéreuse, et seuls les petits tonnages permettent les grandes séries. Parallèlement, depuis quelques dizaines d'années il est possible d'assister à la disparition à peu près complète des carrossiers pour voitures particulières, compensée par un développement remarquable des carrossiers industriels. Le nombre de types de carrosserie est considérable, chacun s'efforçant dans sa spécialité de réaliser le plus grand nombre de modèles possibles avec, pour des questions de prix de revient, le maximum d'éléments communs.

Il est à noter que 280 carrossiers industriels étaient en activité en France en 1973.

1.3. Types de véhicules et carrosseries. — Quels types de véhicules et carrosseries utilise-t-on actuellement ? Dans les petits tonnages, jusqu'à 3,5 t de masse totale remorquée, on trouve des breaks ou voitures privées aménagés pour l'utilisation commerciale (ils permettent ainsi un usage mixte travail-loisir) et des fourgonnettes tôlées le plus fréquemment ou parfois en plateau. Dans les tonnages à partir de 3,5 t on fabrique des fourgons tôlés, des plateaux nus, des plateaux avec ridelles hautes ou basses, des bétaillères, des fourgons frigorifiques pour les fruits, légumes et viandes, sans compter toutes les carrosseries spéciales très

diverses et très nombreuses de transport de voitures, de ciment en vrac, de bennes de chantiers, de travaux publics, de fers pour bâtiments, de collectes d'ordures ménagères, etc. Une catégorie spéciale de carrosserie est représentée par la semi-remorque qui permet une plus grande souplesse d'utilisation et dont le développement est considérable depuis 1950.

Les agriculteurs disposent de carrosseries qui leur sont propres pour le transport à l'intérieur de l'exploitation, le plus souvent des remorques accrochées au tracteur de la ferme pour le transport du fourrage, de l'engrais, de la récolte. De plus en plus fréquemment, ils font appel à des véhicules routiers de fort tonnage, souvent loués à des entreprises, pour les transports lourds à plus grande distance (betteraves, blé, etc.).

Un développement important est réservé aux véhicules spéciaux, à utilisation particulière : chasse-neige, porte-foreuses, grues portées, etc.

2. TECHNIQUE ET CONSTRUCTION DES VÉHICULES UTILITAIRES

L'évolution du véhicule industriel et l'extension de son utilisation ont apporté, depuis plusieurs décennies, des perfectionnements remarquables aussi bien en ce qui concerne le dessin que les performances. Mais la disposition, la répartition des organes, les principes mêmes de construction ont, sauf pour les véhicules légers, peu évolué, alors que dans le domaine de la voiture particulière, la place du moteur, les transmissions par les roues avant ou arrière sont remises sans cesse en question. Le poids lourd reste à peu près semblable à lui-même, moteur avant sur un châssis en tôle pliée avec une boîte de vitesses et une transmission par les roues arrière. Cela n'exclut pas et de loin, le progrès et nous l'avons dit, hors cette base, il ne reste rien du camion à bandage plein qui a roulé depuis l'origine de l'automobile jusqu'à 1940 pour certains modèles. Les impératifs sont cependant restés les mêmes pour assurer le meilleur usage de tous les matériels.

2.1. Qualités du véhicule industriel. — Une enquête auprès des utilisateurs a permis de définir les qualités indispensables à un véhicule industriel moderne. L'ordre adopté peut être différent selon les époques et les pays et certaines de ces qualités pourront prendre le pas sur d'autres : la fiabilité, la longévité, la charge utile transportable, le prix, la facilité d'entretien et de réparation, le confort considéré comme élément d'agrément et de sécurité, les performances, la consommation, les formes extérieures.

2.1.1. Fiabilité. — Elle assure un kilométrage parcouru sans incident entre révisions programmées.

Tout arrêt imprévu dans les transports de personnes ou de marchandises coûte très cher et perturbe l'ensemble de l'exploitation. Dans ce domaine particulier les transports routiers réguliers rejoignent les normes d'utilisation de l'aviation commerciale et des chemins de fer. Pour ce motif, les entreprises américaines de transport public ont toujours préféré le moteur Diesel au moteur à essence, malgré le faible prix de celle-ci aux États-Unis d'Amérique, pour le fait que le premier est moins sujet aux petites pannes que le second (petites pannes souvent lourdes de conséquences dans l'exploitation d'autobus à horaire fixe, par exemple).

2.1.2. Longévité. — Le kilométrage total que peut parcourir un matériel doit être le plus grand possible pour permettre un amortissement réduit. Le prix d'achat du matériel passe au second plan pour beaucoup d'utilisateurs qui préfèrent une longue utilisation sans révision.

2.1.3. Charge utile transportable. — Elle est aussi un élément important dans le calcul de la rentabilité d'un véhicule industriel. Ainsi les constructeurs cherchent-ils à diminuer au maximum le poids mort par une étude poussée du matériel et par l'utilisation des alliages légers dans certains cas, en particulier dans la construction des carrosseries. Ce genre de carrosserie, très utilisée en Europe et aux États-Unis d'Amérique, l'est assez peu en France par le prix élevé des matériaux de base. La diminution du poids mort destinée à augmenter la charge utile dans la limite du poids total roulant autorisé ne doit cependant pas entraîner une diminution de la résistance du matériel et de sa longévité. Certains matériels apparemment séduisants par leur légèreté peuvent donner lieu à des déboires en utilisation.

2.1.4. Prix. — C'est là un point important lors de l'achat d'un véhicule. Mais ce poste n'a plus la même importance que jadis et le client a appris à juger l'intérêt d'un matériel robuste et de bonne qualité. Lors de l'achat d'un matériel, longévité et charge utile seront des éléments de sélection plus importants que le prix.

2.1.5. Facilité d'entretien et de réparation. — Le coût des réparations est élevé, il importe donc que celles-ci soient faciles à exécuter pour en diminuer le coût au maximum. L'entretien journalier est tout aussi important pour éviter pannes et incidents. Il doit être rendu aussi aisé que possible au chauffeur ou à l'atelier d'entretien (vérification des niveaux d'eau, d'huile, contrôle des fuites éventuelles, nettoyage des filtres à air, à huile). L'apparition des cabines basculantes a permis de rendre plus faciles les déposes et démontages importants (moteur, radiateur, changement de pompe d'injection, d'injecteur), mais elles ne doivent pas être basculées pour les contrôles journaliers qui doivent pouvoir être réalisés très rapidement de l'extérieur ou de l'intérieur. Toutes les cabines modernes, même fixes, répondent à ces nécessités.

2.1.6. Confort. — Il était jadis rudimentaire et passait à l'arrière-plan. Il est devenu un élément important dans le choix d'un matériel dont l'utilisation, sur les grands parcours routiers, oblige le conducteur à rester au poste de conduite pendant de longues heures. Tous les constructeurs présentent des cabines de grand confort, avec des sièges réglables en tous sens et selon le poids du conducteur, et un intérieur dont la présentation et le fini sont identiques à ceux des meilleures voitures particulières. Ce confort n'est pas réalisé que pour l'agrément. Il possède un rôle important dans la sécurité ; en diminuant la fatigue de conduite, il repousse le recul de fatigue au-delà des heures d'utilisation, il diminue ainsi les risques d'accident.

2.1.7. Performances. — Elles sont liées à la puissance, à la valeur de la transmission, au freinage. Les puissances actuelles permettent d'augmenter les vitesses moyennes, donc d'accélérer les rotations d'un matériel. Elles permettent aussi de moins gêner les autres usagers de la route, en particulier en rampe, par des vitesses trop lentes. Ces augmentations de puissance et de vitesse exigent en contrepartie des transmissions évoluées et des freins efficaces pour conserver une sécurité suffisante.

2.1.8. Consommation. — En ce qui concerne ce point aucune explication n'est nécessaire. Il est évident que le futur utilisateur recherchera le véhicule le plus économique à l'emploi quotidien, mais la consommation la plus faible n'est pas obligatoirement celle du meilleur matériel et elle n'interviendra donc qu'après les autres éléments. Notons cependant qu'une différence de consommation de gasoil de 4 litres en plus (la consommation évolue entre 45 et 55 litres pour cent kilomètres, selon les marques, pour un matériel de 300 à 350 chevaux) se traduit sur une année d'utilisation, soit environ 100 000 kilomètres, par un supplément de 4 000 litres. Il importe donc que les autres qualités qui améliorent la rentabilité soient réelles pour compenser une telle différence.

2.1.9. Formes extérieures. — Les formes extérieures, et parfois les aménagements extérieurs et intérieurs peuvent intervenir dans le choix d'un matériel, mais avec une importance d'autant plus faible que tous les véhicules actuels sont d'une ligne presque toujours heureuse et parfois l'œuvre de stylistes, spécialistes en dessins de carrosserie automobile.

2.2. Obligations. — Avant d'examiner les différents éléments qui constituent un véhicule industriel, rappelons que dans tous les pays, il existe un code de la route qui fixe

	Seuils de tonnage	Obligations correspondant à ces seuils
Tous véhicules	2 t	Au-dessus de ce M.T.M.A., la circulation et le stationnement sont interdits en zone bleue de 14 h à 20 h 30 sauf si le véhicule a, au plus, 8 m² au sol (dans le cas des ensembles articulés, cette surface au sol est calculée sur la seule semi-remorque).
Tous véhicules	3,5 t	Au-dessus de ce M.T.M.A., les véhicules ne peuvent être conduits que par les titulaires du permis C « Poids Lourds ». Au-dessus de ce M.T.M.A., le stationnement de longue durée est interdit dans Paris de 9 h à 12 h 30 et de 14 h à 20 h 30. À partir de ce M.T.M.A., le stationnement même pour livraison est interdit dans Paris de 18 h à 20 h 30 sauf si la surface au sol est au plus égale à 10 m² (surface calculée sur la seule semi-remorque dans le cas des ensembles articulés).
Tous véhicules	6 t	À partir de ce M.T.M.A., les visites techniques sont obligatoires. Au-dessus de ce M.T.M.A., les véhicules de transport professionnel et de location doivent être couverts par une licence C (valable jusqu'à 11 tonnes, ce tonnage étant exclu). En dessous, un récépissé de déclaration est seul nécessaire.
Tous véhicules	10 t	Au-dessus de ce M.T.M.A., la vitesse est limitée à 85 km/h (jusqu'à 15 tonnes).
Tous véhicules	11 t	Au-dessus de ce M.T.M.A., le stationnement, même pour livraison, est interdit à Paris de 14 h à 20 h 30 sauf si la surface au sol est inférieure à 14 m² et la largeur égale au maximum à 2,35 m (la surface au sol est calculée sur la seule semi-remorque dans le cas des ensembles articulés). À partir de ce M.T.M.A. les véhicules de location et de transport professionnel doivent être couverts par une licence B (valable jusqu'à 19 tonnes incluses).
Essieu simple	13 t	Charge maximale autorisée sur un « essieu simple ».
Tous véhicules	15 t	Au-dessus de ce M.T.M.A., la vitesse est limitée à 75 km/h (jusqu'à 19 tonnes incluses).
Tous véhicules	16 t	Au-dessus de ce M.T.M.A., les véhicules doivent être dotés obligatoirement d'un double circuit de freinage.
Porteurs 2 essieux	10 t	À partir de ce M.T.M.A., les porteurs à 2 essieux sont astreints au paiement de la taxe à l'essieu.
Remorques	16,5 t	À partir de ce M.T.M.A., les remorques sont assujetties à la taxe à l'essieu.
Porteurs	19 t	Au-dessus de ce M.T.M.A., les véhicules porteurs doivent être dotés de 3 essieux.
Tous véhicules	19 t	Au-dessus de ce M.T.M.A., la vitesse est limitée à 65 km/h (jusqu'à 26 tonnes). Au-dessus de ce M.T.M.A., la circulation et le stationnement sont interdits de 9 h à 12 h 30 et de 14 h à 20 h 30 dans la zone verte de Paris. Au-dessus de ce M.T.M.A., les véhicules de transport professionnel et de location doivent être couverts par une licence A.
Porteurs	25 t	À partir de ce M.T.M.A., les porteurs 3 essieux sont assujettis à la « taxe à l'essieu ».
Ensembles articulés	25 t	À partir de ce M.T.R., les ensembles composés d'un tracteur 2 essieux et d'une semi-remorque 1 essieu sont assujettis à la « taxe à l'essieu ».
Tous véhicules	26 t	Au-dessus de ce M.T.M.A., la vitesse est limitée à 60 km/h.
Porteurs	26 t	Aucun porteur à 3 essieux ou plus ne peut dépasser ce M.T.M.A.
Ensembles articulés	31 t	À partir de ce M.T.R., les ensembles articulés composés d'un tracteur 3 essieux et d'une semi-remorque 1 essieu sont assujettis à la « taxe à l'essieu ».
Ensembles articulés	34,501 t	À partir de ce M.T.R., les ensembles articulés composés d'un tracteur 2 essieux et d'une semi-remorque 2 essieux sont assujettis à la « taxe à l'essieu ».
Tous ensembles	35 t	Limite maximale en vigueur actuellement pour tous les ensembles de véhicules (tracteur et semi-remorque et camion porteur et remorque).
Tous ensembles	38 t	Ce M.T.M.A. devrait être retenu, dans la réforme du Code de la route en préparation, pour tous les ensembles de véhicules : ensembles articulés (tracteur et semi-remorque) ; camion - remorque ; ensembles doubles (1 tracteur tirant 2 semi-remorques) qui pourraient circuler sans autorisation spéciale. La mise en application pratique de cette nouvelle norme interviendrait plus tardivement.

les dimensions, les charges par essieu et les vitesses. Ainsi en France :

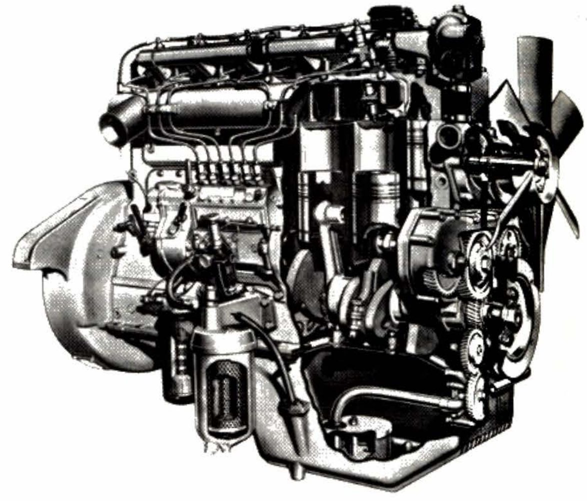
— la largeur maximale est de 2,500 m ;

— la longueur maximale est de 11 m pour un véhicule isolé ; de 15,500 m pour un ensemble articulé, tracteur et semi-remorque ; de 18 mètres pour un véhicule avec remorque.

À titre indicatif, le tableau de la page précédente, réalisé par les moteurs Perkins, donne les obligations correspondant aux différents seuils de tonnages, en France, en 1971. Il montre combien la réglementation, en évolution permanente, est complexe. Elle ne concerne pas seulement le Code de la route mais aussi la coordination rail-route, la fiscalité, la circulation urbaine et certains règlements.

Si les vitesses et les charges sont réglementées, les hauteurs ne sont pas limitées en France ; toutefois, pour ne pas être gêné par le passage des ponts, des installations électriques des chemins de fer on de tout autre obstacle, en pratique, elles ne dépassent pas 4 mètres.

Tout véhicule dépassant ces tonnages et dimensions en largeur ou en longueur, devient un convoi exceptionnel soumis pour ses déplacements à des règles spéciales sur autorisation préalable.



Moteur Diesel, 6 cylindres ; injection directe ; puissance maximale : 172 ch à 2 400 tr/mn ; couple maximal 570 N.m (*Daf*)

3. LE MOTEUR

3.1. Évolution. — Depuis une dizaine d'années, c'est l'un des éléments du véhicule industriel dont l'évolution a été la plus spectaculaire par l'augmentation des puissances, en particulier dans le domaine des gros porteurs. Cette évolution, si elle marque un temps d'arrêt, est cependant loin d'être terminée ; elle prépare l'utilisation de la turbine à gaz.

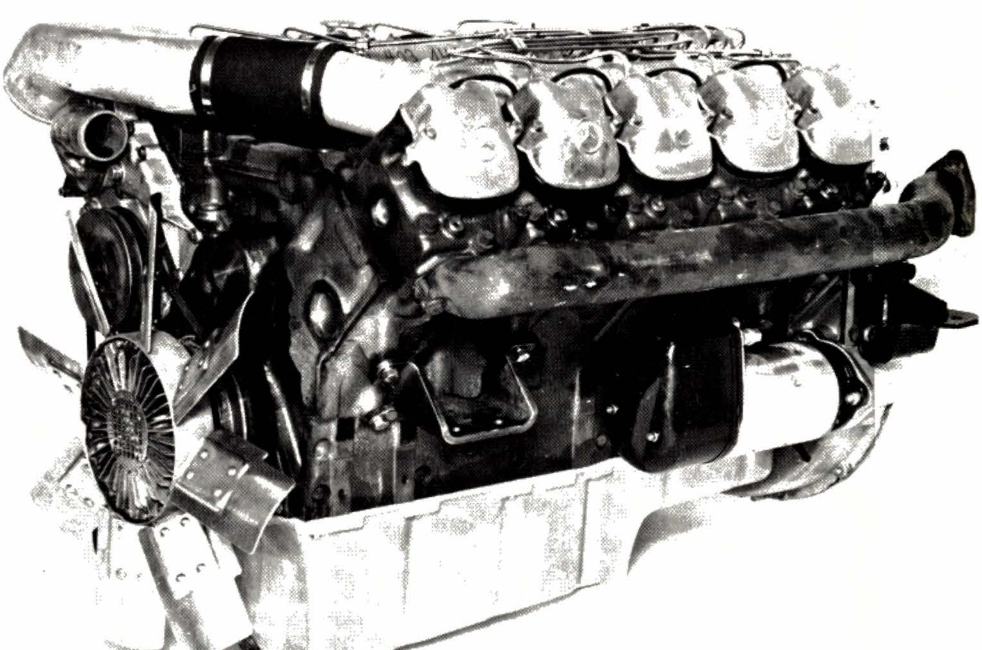
Le moteur à essence reste le plus fréquent dans les véhicules légers, jusqu'à 1 000 kg de charge utile. Lorsque celle-ci est comprise entre 1 000 et 2 000 kg, moteur à essence et moteur Diesel sont utilisés en parts égales. Au-dessus de ces charges le diesel est seul employé.

Le moteur à essence d'un véhicule industriel est dans tous les cas, dérivé d'un moteur équipant une voiture particulière. Pour des raisons de longévité, sa vitesse de rotation et sa puissance sont diminuées. Ainsi le moteur de la 124 Fiat est adapté sur la fourgonnette 238 de 1 000 kg de charge utile. Le moteur 1 100 ou 1 300 de la R 8 équipe l'Estafette 800 et 1 000 kg de la Régie nationale des usines Renault. Le moteur Diesel, plus économique en utilisation, est parfois aussi commun dans les puissances réduites avec des moteurs de voiture particulière. Tel le moteur de la 404 Peugeot Diesel monté sur la fourgonnette J 7 de 1 800 kg de charge utile de la même marque.

Les véhicules de faible tonnage équipés de moteurs Diesel sont plus chers à l'achat que ceux à moteurs à essence. Cependant comme le combustible est moins coûteux, malgré leur prix plus élevé ils sont plus économiques dans une utilisation intensive.

Pour les grosses puissances et les fortes charges, il n'est plus de choix possible. Le moteur Diesel l'emporte dans tous les cas, pour son économie de marche et sa fiabilité.

Jusqu'en 1968, les moteurs les plus puissants ne dépassaient pas 250 à 270 chevaux de puissance réelle (180 à 200 kW environ) et étaient le plus souvent à six cylindres en ligne. Depuis cette date, pour répondre à des législations nouvelles, imposant une puissance minimale à la tonne (7 ch à 10 ch selon les pays, soit 5 à 7,5 kW), ces puissances ont dépassé 300 ch (220 kW) pour atteindre parfois 350 ch (250 kW) et plus. Cette augmentation des puissances a entraîné un développement des moteurs en V et de la suralimentation qui permet, sous réserve de moteurs bien étudiés pour la recevoir, des gains de masse et de puissance très intéressants. Les moteurs en V sont moins encombrants que les moteurs en ligne, plus rigides de



Moteur à dix cylindres en V à injection directe de 350 ch (*Mercedes-Benz*)

construction grâce à des carters plus ramassés et des vilebrequins plus courts. Ces puissances sont obtenues à des régimes de rotation modérés qui se situent entre 2 200 et 2 600 tr/mn. Ce régime assure une longévité plus grande et un bruit de fonctionnement plus réduit. Les limites légales tolérées pour un camion en marche sont plus difficiles à respecter avec des moteurs à régimes élevés.

Le moteur 6 cylindres en ligne n'est pas pour autant éliminé et de nombreuses marques lui conserveront encore longtemps leur préférence, même dans les fortes puissances. Ceux-ci, grâce à une étude très poussée, ont amélioré leur puissance en conservant un encombrement en longueur proche de celui d'un moteur en V. Plus haut que ce dernier il est cependant possible de le loger dans les cabines à plancher surélevé. Ce type de moteur, très au point, garde ainsi une chance réelle d'utilisation.

La fiche signalétique des moteurs de véhicules industriels peut se résumer ainsi :

— Moteurs à essence de 20 à 60 chevaux réels (15 à 45 kW), cylindrée : 500 à 2 000 cm^3, régime de rotation : 3 500 à 4 500 tr/mn ;

— Moteurs Diesel légers de 45 à 55 ch (33 à 40 kW), cylindrée : 1 500 à 2 300 cm^3, régime de rotation : 3 à 4 000 tr/mn ;

— Moteurs Diesel moyens de 60 à 150 ch (45 à 110 kW), cylindrée : 2 à 6 litres, avec des régimes de 2 à 3 000 tr/mn ;

— Moteurs Diesel de grande puissance jusqu'à 350 ch (260 kW) environ, pouvant atteindre 15 litres de cylindrée avec des régimes de rotation de 2 000 à 2 600 tr/mn.

3.2. Augmentations de régime. — Grâce aux augmentations de régimes moteurs et à une étude poussée des pièces de fonderie en fonte ou en alliage léger (pour favoriser l'allègement et gagner en rigidité) la masse des moteurs Diesel a diminué sensiblement. Cela a permis de parvenir à de grandes puissances sans augmenter la masse du moteur un moteur moderne de 300 ch (220 kW) dont la masse par cheval est voisine de 3 kg et pratiquement plus léger, 900 kg environ, qu'un moteur de 200 ch (150 kW) des années 1960 (avec 5 à 6 kg par cheval sa masse atteignait 1 000 kg). Cette augmentation des puissances et des régimes, sans augmentation du bruit de fonctionnement, avec des longévités en constante amélioration est une très belle réussite à l'actif des constructeurs.

En ce qui concerne la suralimentation, de nombreuses formules sont ou ont été envisagées. Certaines sont encore expérimentales. Celle qui est la plus fréquente consiste dans l'emploi soit d'un compresseur centrifuge entraîné par les gaz d'échappement, soit d'un compresseur volumétrique, type Roots, entraîné mécaniquement. Cette dernière formule de réalisation plus onéreuse est malgré son intérêt, de moins en moins utilisée (V. t. 4, La route, chap. 12).

3.3. Turbine. — Toujours dans les grandes puissances, au-dessus de 350 ch (260 kW), la turbine commence à être utilisée pour équiper des véhicules routiers. Les premières applications à la traction routière ont vu le jour en 1951 en France (Laffly a utilisé une turbine Turboméca) et en 1952 aux États-Unis d'Amérique (Kenworth-Boeing). Un prototype est maintenant au point chez tous les grands constructeurs et est prêt à être commercialisé vers 1975. Bien que la turbine soit encore utilisée à titre expérimental car elle a à être améliorée pour être plus économique en carburant, sa robustesse, sa facilité d'entretien, les fortes puissances obtenues avec un poids réduit lui donne toutes ses chances pour des applications à la route.

3.3.1. Principe de fonctionnement. — Le principe de fonctionnement est le même que celui des turbines montées sur les automobiles et est proche de celui des turbines des avions avec turbo-propulseur. Un compresseur calé sur le même axe que la turbine primaire fournit l'air comprimé nécessaire à la combustion. Une turbine libre placée après la turbine primaire entraîne la transmission du véhicule par l'intermédiaire d'un embrayage fluide ou d'un transformateur de couple et d'un groupe de réduction qui ramène la vitesse élevée de la turbine de 30 000 tr/mn à 3 000 tr/mn environ.

3.3.2. Application. — L'application de la turbine se développera plus rapidement sur les véhicules industriels de forte puissance que sur les autres voitures. Les avantages de cette utilisation sont plus sensibles pour les premiers et la place disponible plus importante facilite l'adaptation et le montage d'accessoires volumineux ; échangeurs, filtres à air et silencieux en particulier.

3.3.3. Avantages. — L'examen des résultats obtenus avec les turbines actuellement en essais sur route chez General Motors Ford aux États-Unis d'Amérique, Man en Allemagne ou Leyland en Grande-Bretagne permet déjà de dresser la liste des réels avantages qu'elles offrent en utilisation.

— Fiabilité permettant de parcourir 600 000 km, avant révision générale. L'entretien est réduit et facile pendant cette période.

— Démarrage immédiat sans attendre une mise en température inutile. Cet avantage est précieux, par exemple, sur les véhicules d'intervention rapide de lutte contre l'incendie sur les aéroports.

— Couple moteur maximal au démarrage lorsque l'arbre de la turbine libre, dite de travail, est immobilisé. Cet avantage d'un couple maximal au démarrage, qui rappelle celui que donnaient les moteurs à vapeur, permet d'utiliser des boîtes de vitesses à 4 ou 5 rapports au lieu des 8, 10 et même 12 nécessaires, avec un moteur Diesel. Ainsi la turbine de la General Motors de 260 ch (190 kW) dont le couple est de 800 Nm sur l'arbre de sortie à 3 000 tr/mn atteint 1 600 Nm lorsque cet arbre est calé au démarrage. Un moteur Diesel de puissance déterminée tourne, selon les marques, à une vitesse comprise entre 1 200 et 1 500 tr/mn et son couple moteur atteint 800 à 1 000 Nm.

— Suppression de l'eau de refroidissement, circuit de graissage simplifié, consommation d'huile réduite.

— Construction simple grâce au nombre réduit de pièces. Le prix encore élevé de la matière utilisée pour la réalisation des ailettes devrait diminuer sensiblement lorsque la fabrication se fera en série. Cela permettra aux constructeurs de fournir des turbines à un prix égal à celui d'un moteur Diesel de puissance identique.

— Masse plus faible. Une turbine de 350 à 400 ch

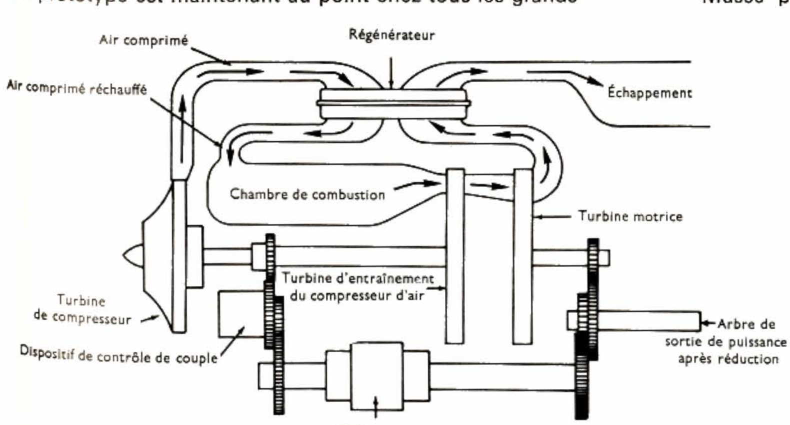
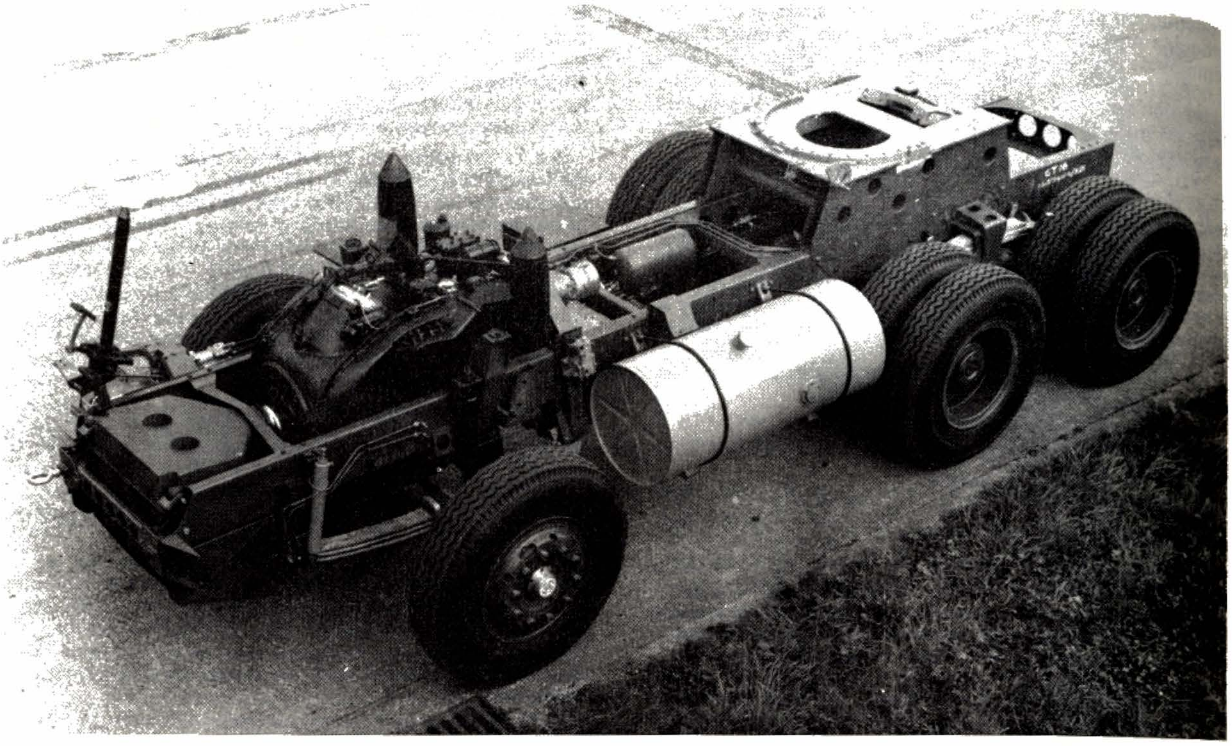


Schéma de principe d'une turbine à gaz moderne avec dispositif de transfert de puissance (*General Motors*)



Châssis pour une masse de 44 tonnes équipé d'une turbine à gaz de 350-400 ch ; on remarque le faible encombrement de la turbine ; à l'avant entre les longerons, le filtre d'air et le silencieux d'aspiration (*British Leyland*)

(260 à 280 kW) a une masse inférieure de 4 à 500 kg à celle d'un moteur Diesel de 350 ch. Ce qui est gagné sur cette masse est à ajouter à la charge utile et est donc « payant » pour l'utilisateur.

— Du côté confort, la turbine apporte encore des éléments favorables : absence de vibrations et bruit de fonctionnement réduit, appréciable tant à l'intérieur de la cabine qu'à l'extérieur. L'absence d'oxyde de carbone et de fumées dans les gaz d'échappement diminue les risques de pollution atmosphérique.

— La consommation de la turbine n'arrive pas encore au niveau d'économie du moteur Diesel, mais les résultats déjà acquis permettent d'obtenir des consommations raisonnables qui seront encore diminuées par l'amélioration des échangeurs de chaleur utilisés pour réchauffer l'air frais, avant son admission dans la turbine, en utilisant les gaz d'échappement. De plus, les turbines peuvent être alimentées avec des combustibles bon marché (sous réserve qu'une fiscalité toujours à l'affût de taxes nouvelles ne vienne pas détruire cet avantage !). Les turbines fonctionnent en principe au kérosène mais peuvent aussi utiliser les produits plus lourds et des gaz liquéfiés.

Quel est l'avenir de la turbine dans la prochaine décennie ? Certains la voient remplacer le moteur Diesel dans toutes ses applications. Il semble toutefois que la turbine n'éliminera pas le moteur Diesel, qui est arrivé à un stade de quasi-perfection pour les puissances inférieures à 260 kW. La turbine concurrencera valablement le moteur Diesel dans les puissances supérieures (280 à 430 kW), que la course actuelle au tonnage et à la puissance ne manquera pas de rendre indispensable. Dans ces fortes puissances, la masse et l'encombrement des moteurs classiques deviendraient prohibitifs.

Mais le développement de la turbine routière est lié à celui du réseau d'autoroute ; la turbine s'accommode mal des routes sinueuses et de la circulation urbaine. Ce développement est lié aussi à un réseau, encore à créer, de spécialistes capables d'assurer son entretien. De plus, sa fabrication nécessite des investissements très importants que peuvent seuls supporter de très grands constructeurs, investissements qui risquent donc de modifier dans l'avenir l'état actuel de la construction européenne en obligeant à des fusions et à des regroupements nouveaux.

4. LA TRANSMISSION

Dans la transmission, sont groupés tous les organes disposés à la sortie du moteur et qui permettent l'entraînement des roues.

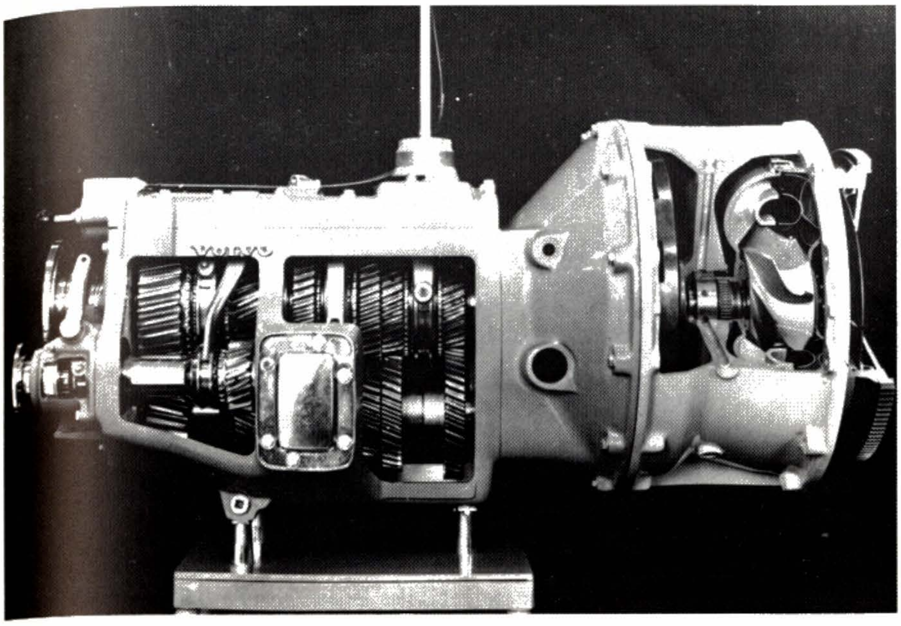
4.1. Embrayage. — Il est soit sec et à disque, dans la plupart des boîtes de vitesses ordinaires, soit fluide dans les boîtes de vitesses automatiques ou semi-automatiques et dans certaines boîtes ordinaires (Volvo).

Les embrayages secs sont en principe monodisque. La commande en est assurée mécaniquement ou hydrauliquement ; elle est parfois assistée, dans les fortes puissances, pour vaincre l'effort important qu'imposent les ressorts très puissants nécessaires aux couples moteurs élevés. Chez certains constructeurs cette assistance peut être momentanément supprimée pour faciliter les manœuvres délicates, difficiles à réaliser avec un embrayage assisté, moins précis.

Les embrayages fluides sont assez rarement utilisés avec les boîtes de vitesses ordinaires. Ils permettent des manœuvres d'embrayage très souples mais ne sont pas d'un rendement toujours très favorable. En revanche ils sont indispensables dans certaines boîtes semi-automatiques (Wilson) ou entièrement automatiques. Dans ce dernier cas le transformateur ou amplificateur de couple est plus intéressant car, outre la fonction embrayage, il assure une multiplication du couple qui permet de diminuer le nombre de rapports mécaniques de la boîte de vitesses.

4.2. Boîte de vitesses. — Sur les véhicules de petite puissance, les boîtes de vitesses, identiques à celles montées sur les voitures particulières, sont le plus fréquemment à 4 vitesses, avec train parallèle et pignonnerie cylindrique traditionnelle. Depuis quelques temps, des transmissions entièrement automatiques apparaissent sur les véhicules urbains où les changements de vitesses sont très fréquents (Saviem, Borg Warner). Ces boîtes sont du type automobile, avec transformateur de couple et boîte à trains épicycloïdaux à trois rapports.

Dans le cas de moyennes et fortes puissances, les boîtes de vitesses permettent 5 à 6 ou 12 rapports (soit 5 ou 6 vitesses sans réducteur en sortie de boite, soit 10 ou 12 rapports avec réducteurs). Sur ce type de matériel les boîtes ordinaires sont seules utilisées. Pour les engins de



Boîte de vitesses à 8 rapports, avec amplificateur de couple (à droite), destinée aux camions lourds (*Volvo*)

grande puissance, les boîtes de vitesses sont le plus souvent à 10 ou 12 rapports avec deux gammes de vitesses et réducteur avec relais commandé électro-pneumatiquement. Les rapports finaux sont le plus souvent surmultipliés pour la marche économique à vitesse élevée sur autoroutes en réduisant au maximum le régime du moteur. Dans ces puissances apparaissent des tentatives d'automatisation de la transmission, soit par boîte entièrement automatique (Allison, Divabus), soit par une semi-automaticité obtenue à l'aide d'un transformateur de couple avec assistance de passage des vitesses (Volvo).

Les boîtes automatiques sont d'application beaucoup plus fréquente sur les véhicules grands routiers de transport de personnes. En version semi-automatique les boîtes de vitesses sont couramment utilisées sur les autobus urbains (Wilson).

Malgré le très grand intérêt qu'elles présentent pour le personnel qui est alors déchargé des manœuvres fastidieuses et fatigantes du passage des vitesses, et malgré la protection qu'elles offrent à l'ensemble de la transmission finale (en évitant les à-coups et les fausses manœuvres), leur développement est encore limité par le prix élevé et le rendement plus faible qui provoque une augmentation sensible de la consommation. Cependant, en perfectionnant les boîtes de vitesses actuelles ou en utilisant de nouveaux dispositifs pour automatiser les transmissions conventionnelles, il sera possible de développer l'emploi des boîtes de vitesses à passage automatique, qui, notons-le, sont indispensables sur les véhicules à turbine pour maintenir, sans intervention du conducteur, un régime optimal de la turbine.

4.3. Disposition des organes. — Sur les véhicules moyens et lourds, en règle général, le moteur est à l'avant et la transmission de la puissance se fait par les roues arrière. Pour les cars et autobus, le moteur est le plus souvent au milieu du véhicule, sous le plancher, ou à l'arrière, la transmission restant assurée par les roues arrière.

Sur les véhicules légers, jusqu'à 1 500 kg de charge utile (à l'exception des fourgonnettes Volkswagen et Fiat 850), le moteur est le plus souvent à l'avant et la transmission du mouvement, dans le cas des roues avant motrices, est assuré par une boîte de vitesses et un groupe différentiel formant un seul bloc lié au moteur.

Sur les véhicules de 1 500 à 3 500 kg de charge utile, la disposition générale des organes est le plus souvent identique à celle des véhicules moyens et lourds, c'est-à-dire moteur à l'avant et propulsion par les roues arrière.

Pour les véhicules lourds, le pont arrière peut être à simple ou à double réduction lorsque les rapports de démultiplication ne dépassent pas 1 à 6 ou 1 à 7. Cette deuxième réduction peut être soit dans le carter central du pont (cas le plus fréquent), soit dans les moyeux de roues. Cette disposition permet, en diminuant les efforts de couple moteur, de réduire les dimensions de la partie centrale du pont arrière et, de ce fait, d'augmenter la hauteur libre entre le sol et la partie centrale du pont. Cet avantage est particulièrement intéressant pour les véhicules de travaux publics circulant en mauvais terrain.

5. LE CHÂSSIS

Tous les éléments mécaniques (moteur, transmission, suspension, direction) sont portés par un cadre-châssis (l'ensemble constitue le châssis) qui reçoit la carrosserie et la cabine.

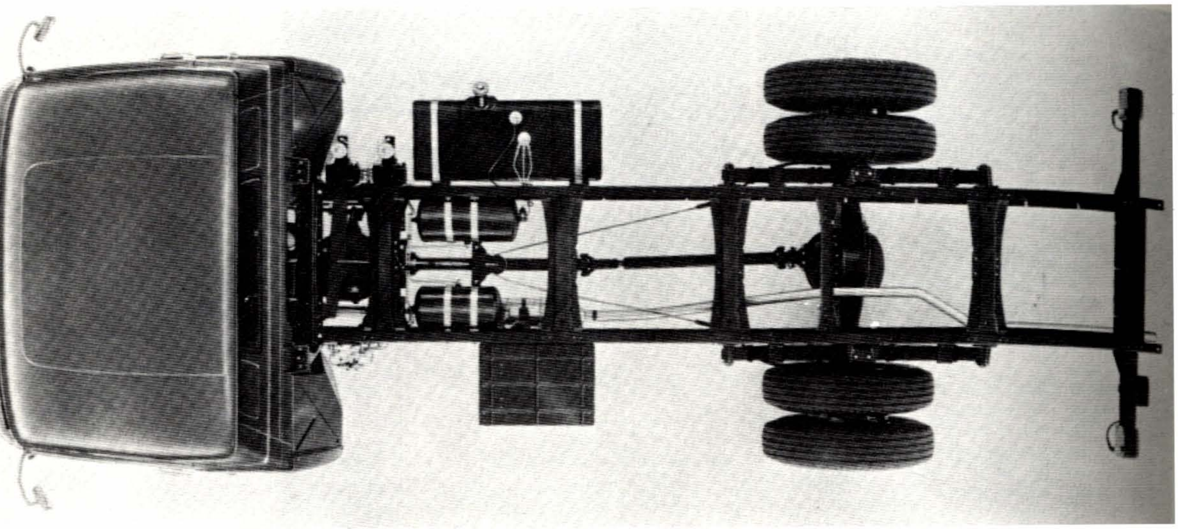
Ce cadre-châssis est le plus souvent de forme simple avec une partie supérieure horizontale pour faciliter la pose de la carrosserie; il est constitué de longerons et de traverses en tôle d'acier emboutie, reliés entre eux par soudure, rivetage ou boulonnage.

La longueur du châssis change selon les applications et utilisations. Un châssis court sera réservé aux transports de matériaux de grande masse volumique: benne de travaux publics, fardier, véhicules de ramassage d'ordures ménagères. Un châssis long équipera un véhicule pour le transport de marchandises légères mais volumineuses (fourgon de déménagements, transports de cartonnages, etc.).

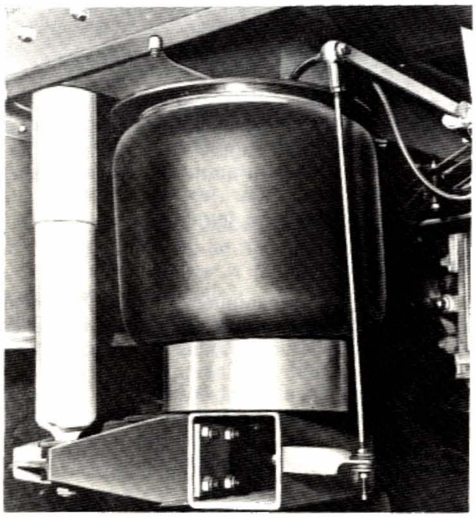
6. LA SUSPENSION

Sur les véhicules légers et sur certains véhicules de moyens tonnages, la suspension est le plus souvent assurée par des ressorts hélicoïdaux ou des barres de torsion du type automobile. Parfois, sur certaines camionnettes les suspensions allient ces deux types de ressorts différents à l'avant et à l'arrière. Pour les autres véhicules, à quelques exceptions près, la suspension est assurée par des ressorts à lames à faible flexibilité (3 à 5 % ou 3 à 5 mm par 100 kg de charge). Une plus grande flexibilité — elle est de 15 à 30 % sur une voiture légère — entraînerait des courses, donc des variations de hauteur entre fonctionnement à vide et fonctionnement avec une charge importante. Pour éviter cette trop grande course et une dureté excessive à vide les suspensions sont fréquemment à flexibilité variable: soit des appuis de forme spéciale permettent de diminuer la longueur active du ressort lorsque la charge augmente, soit des ressorts auxiliaires dits ressorts compensateurs à lames, à bloc de caoutchouc ou même à coussin d'air (Berliet, Man) sont interposés.

La suspension à air intégrale, très séduisante dans son principe n'est encore que peu appliquée aux véhicules industriels. Elle est onéreuse et supporte mal les sur-



Vue en plan d'un châssis de camion (12 à 16 t) à deux essieux (*Fiat-Italie*)



Élément d'une suspension à air de 350 mm de diamètre, montée sur autobus Leyland; à gauche, l'amortisseur télescopique; à droite, la tige de commande du clapet régulateur de niveau (*Dunlop*)

charges. Elle est réservée aux autobus et à certains cars grands routiers.

7. LE FREINAGE

Pour assurer une sécurité sans défauts, le freinage a toujours été l'un des problèmes les plus difficiles à résoudre pour les véhicules lourds roulant à grande vitesse. L'augmentation de la masse totale et des vitesses a obligé les bureaux d'études à des tours de force techniques qui sont parfaitement réussis. Il est actuellement possible d'assurer pendant plusieurs dizaines de milliers de kilomètres des décélérations importantes sans révision des freins et sans incidents.

En France, la décélération minimale obligatoire est de 5 m/s² pour les freins principaux et de 2,5 m/s² pour le frein de secours. Le frein de parc doit maintenir immobile un véhicule, quelle que soit sa masse totale dans une rampe de 18 %.

À de rares exceptions près, et contrairement à ce qui est réalisé sur les voitures légères où les freins à disques sont la règle, les freins des véhicules industriels de tout tonnage sont toujours à tambour de grands diamètres (420 mm au maximum) et de grande largeur (200 mm environ).

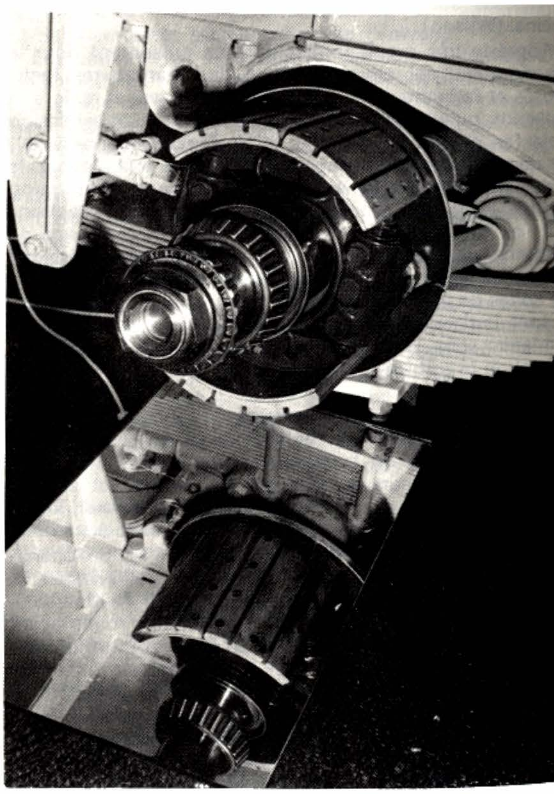
La commande des mâchoires porte-garnitures est obtenue de diverses façons.

Sur les véhicules légers, jusqu'à 3,5 tonnes de masse totale, la commande de ces mâchoires est obtenue hydrauliquement avec ou sans l'aide d'un servofrein à dépression.

Sur les véhicules moyens, de 3,5 tonnes à 11 tonnes, la commande peut être soit hydraulique avec assistance d'un servofrein à dépression ou à air comprimé, soit entièrement à air comprimé.

Sur les véhicules lourds, jusqu'aux charges maximales admises, la commande est soit hydraulique avec servofrein à air comprimé, soit entièrement pneumatique. À partir de 16 tonnes de masse totale roulant, il est obligatoire que la commande de freinage soit à deux circuits indépendants pour augmenter la sécurité qui serait compromise en cas de rupture de l'un des circuits.

Sur les véhicules de transports de personnes et sur certains véhicules industriels, des ralentisseurs électriques



Frein de 350 mm de diamètre à commande par air comprimé sur semi-remorque (*Trailor*)



Intérieur d'une cabine de véhicule moyen porteur (10 à 16 t) (*Magirus-Deutz*)

ou hydrauliques sont montés sur la transmission. Ces dispositifs sont extrêmement sûrs et soulagent notablement les freins à tambour, en région accidentée. Ils sont obligatoires sur les cars et autobus circulant en montagne. Sur certains véhicules lourds, un frein d'appoint est prévu pour agir en ralentisseur, grâce à un clapet à fermeture commandée qui obture la canalisation d'échappement et fait fonctionner le moteur en compresseur, augmentant ainsi l'effet de frein moteur.

8. LA DIRECTION

Sur les véhicules légers et moyens, la direction est analogue à celle d'une automobile. Sur les véhicules lourds où la charge sur l'essieu avant peut atteindre 6 tonnes, les directions sont assistées par un vérin hydraulique qui vient soulager l'effort que doit fournir le conducteur, effort important aux faibles vitesses et en manœuvre. L'étude de ce dispositif d'assistance nécessite de respecter un certain nombre de règles pour assurer une direction précise, sans effet de « lacets » quelle que soit la vitesse, et de permettre de maintenir la direction, sans effort exagéré, en cas d'arrêt brusque de l'assistance. Ce dernier point est particulièrement important pour assurer une sécurité absolue.

9. LES CABINES

L'utilisation des véhicules de gros tonnages sur de longs parcours, parfois internationaux, a obligé les constructeurs à réaliser des cabines de conduites confortables. En effet, l'usage a montré qu'en accroissant le confort, la fatigue du conducteur diminuait et par voie de conséquence, la sécurité routière augmentait. Cette amélioration, réelle sur les véhicules grands routiers, est moins sensible sur les moyens courriers et les véhicules à usage urbain pour lesquels de grands progrès restent à faire. L'intérieur d'une cabine de véhicule lourd est comparable par son aspect et sa finition à ce qui est réalisé pour les voitures particulières. À l'aspect général agréable s'ajoute le confort des sièges, réglables en tous sens et selon le poids du conducteur. Les longs courriers comportent une couchette. Une climatisation très étudiée permet de maintenir une température agréable dans la cabine, été comme hiver. Certains véhicules destinés à rouler en pays chauds comportent un conditionnement d'air avec groupe frigorifique indépendant.

Cette amélioration du confort ne se limite pas au siège ou à la couchette et à l'aspect général : il est aussi dans la facilité offerte au conducteur pour exécuter les contrôles quotidiens et l'entretien courant. Dans ce domaine un effort considérable a été réalisé et les véhicules actuels, qu'ils soient à cabine fixe ou basculante, sont conçus de façon à ce que l'accessibilité aux organes soit grande (jauges d'huile, radiateur, boîte à fusibles, filtre à air, etc.).

Sur les véhicules de forte puissance avec moteurs en V, la cabine basculante est devenue une règle à peu près générale. Elle facilite l'entretien important et la dépose du moteur. Dans les débuts de son application, de nombreuses erreurs furent commises et elle était souvent moins pratique qu'une cabine fixe bien étudiée. Ces défauts tendent à disparaître. Pour aider à l'amélioration du confort des véhicules industriels, il existe en France un concours qui, selon un cahier de charges très strict mis au point par divers organismes spécialisés et des représentants des chauffeurs routiers, juge des meilleures réalisations des constructeurs de tous les pays.

La cabine de conduite, en particulier dans le cas des cabines dites avancées (basculantes ou non) au-dessus du moteur, dégageant au maximum la longueur disponible, comporte une part importante des mécanismes de conduite, de l'installation électrique ou de freinage. Elle fait partie du châssis livré par le constructeur.

10. LA CARROSSERIE

Si la cabine ne peut être dissociée du châssis, la carrosserie est laissée entièrement à la discrétion de l'utilisateur qui la fait réaliser par un carrossier de son choix.

Les véhicules légers font exception à cette règle, car la carrosserie tôlée, souvent autoporteuse, est livrée par le constructeur. Quelle que soit la carrosserie adoptée, sa durée doit être au moins égale à celle du véhicule porteur.

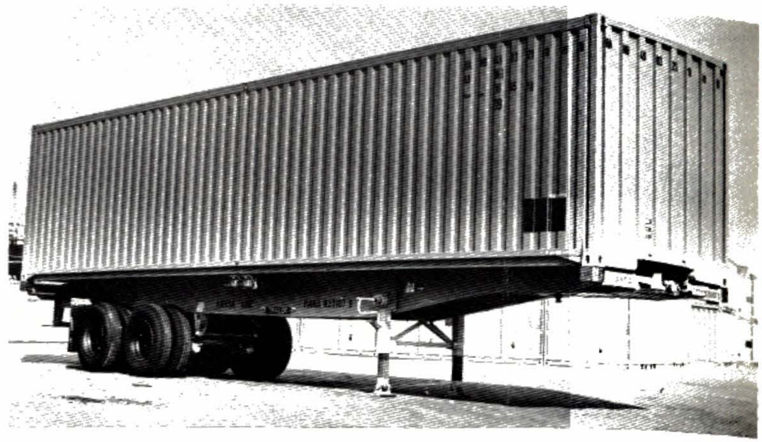
Dans la masse totale roulant d'un camion sont comprises la masse proprement dite du véhicule (appelée souvent poids mort alors qu'il faudrait dire masse morte) et la charge utile. Dans la charge utile prévue par le constructeur pour un châssis-cabine, intervient la masse de la carrosserie. Celle-ci doit être aussi légère que possible pour conserver une charge utile maximale.

Pour gagner sur la masse de la carrosserie, les réalisations modernes utilisent parfois un alliage léger ou le plastique stratifié. Elles sont encore le plus souvent en tôle d'acier et des études particulièrement réussies permettent de réaliser des carrosseries en acier extrêmement légères et résistantes.

11. LES REMORQUE, SEMI-REMORQUE, CONTENEURS

11.1. Remorque. — Pour augmenter la charge utile transportable qui est limitée sur les camions porteurs, il est possible d'atteler une remorque à l'arrière d'un véhicule. Ces ensembles, camions porteurs-tracteurs, le camion devant être renforcé pour cet usage, sont encore très utilisés dans certains pays, en particulier en Allemagne.

Depuis la fin de la dernière guerre mondiale, l'usage de la semi-remorque, très utilisée par les armées américaines, s'est développé remarquablement en Europe et en particulier en France.



Semi-remorque
porte-conteneur
de 13,2 m environ (40 pieds)
(*Baudelaire-Trailor France*)

11.2. Semi-remorque. — La semi-remorque peut être considérée comme une remorque dont l'avant repose sur l'arrière d'un véhicule tracteur. En respectant la répartition des charges légales par essieu, elle permet d'atteindre une masse totale roulant de 35 à 38 tonnes, maximum autorisé en France.

La semi-remorque permet un gain plus sensible sur le « poids mort » qu'un ensemble camion-remorque ; elle apporte une plus grande facilité de roulage sur route difficile, ou en manœuvre et une meilleure tenue de route à grande vitesse que la remorque normale. Comme la remorque, la semi-remorque facilite les livraisons et les rotations accélérées d'un matériel en attelant un tracteur à des semi-remorques « banalisées ».

11.3. Conteneur. — L'actuel et remarquable développement du transport porte-à-porte par l'utilisation du « conteneur » ou caisse-cadre, aux dimensions maximales normalisées de 6,600 m et 13,200 m (20 ou 40 pieds), est facilité avec les semi-remorques dont la lontueur utile disponible permet de recevoir facilement de telle charge en respectant les longueurs maximales autorisées. Pour en faciliter encore la mise en œuvre, les ports et les gares se sont équipés de moyens de levage qui permettent des manutentions sans perte de temps.

12. LES AUTOBUS ET AUTOCARS

Ces véhicules, destinés au transport en commun de personnes, utilisent certains éléments des moteurs ou de la transmission des véhicules industriels. Ils sont cependant de structure très différente et mérite de ce fait une étude spéciale.

12.1. Autobus. — Dans un très grand nombre de villes les autobus ont remplacé les tramways. Plus mobiles, les autobus sont moins gênants pour les autres usagers dans les artères à circulation très dense. Leur autonomie est plus grande et il est possible de créer de nouvelles lignes ou de modifier le tracé des anciennes sans difficulté.

Les autobus, qu'ils soient à usage urbain ou interurbain, sont de conception mécanique identique mais les aménagements de la carrosserie sont différents ; dans le premier cas on prévoit de transporter davantage de personnes debout qu'assises.

Des cahiers de charges très stricts, rédigés par les municipalités, définissent les règles de sécurité et d'utilisation de ces véhicules.

12.2. Autocars ou cars. — Contrairement aux autobus ils ne comportent que des places assises et leur aménagement diffère selon l'utilisation.

Les cars de ligne remplacent certaines lignes de chemin de fer supprimées ou complètent celles existantes. Ils assurent des services réguliers avec des horaires fixes. Les sièges, prévus pour 40 ou 50 personnes, sont conçus en tenant compte de la faible durée de parcours.

Les cars d'excursion sont plus confortables car destinés aux visites de villes ou de lieux distants parfois de plusieurs centaines de kilomètres.

Pour les cars de grand tourisme et de voyages, destinés à de très grands parcours (parfois internationaux), dont la durée peut être de plusieurs jours, le confort et la climatisation sont particulièrement soignés. Certains comportent des toilettes et un bar.

Il est intéressant de noter les différences techniques entre ces véhicules et les camions.



Autocar de grand luxe grand routier avec moteur à turbocompresseur de 250 ch SAE disposé horizontalement sous le châssis à longerons ; sa vitesse de pointe est de 110 km/h



Véhicule lourd (26 t) de chantier à 6 roues motrices 6 × 6 (*Magirus-Deutz*)

12.3. Moteur. — Il est à essence sur les véhicules de moins de 10 places, souvent Diesel sur ceux de 10 à 25 places et uniquement Diesel dans les autres cas. Il est fréquemment le même que celui des véhicules de transport mais son emplacement est différent. Pour utiliser au maximum la surface de plancher, il est placé, soit en dessous de celui-ci, soit à l'arrière en porte-à-faux par rapport à l'essieu arrière. Dans tous les cas son accessibilité est étudiée pour rester aussi grande que possible.

Pour diminuer la consommation et les risques de pollution, Mercedes a réalisé en Allemagne, en 1969 (à titre expérimental), un autobus à usage exclusivement urbain, à transmission électrique alimentée par batterie-tampon avec groupe de charge permanent.

12.4. Suspension. — C'est dans ce domaine que les différences techniques sont les plus sensibles. Pour assurer le meilleur confort, les suspensions de cars et autobus, même si elles utilisent encore les ressorts à lames, sont équipées de ressorts à grande flexibilité. L'utilisation d'amortisseurs est quasi généralisée.

La suspension à air est très répandue sur les véhicules urbains ; en maintenant constante la hauteur par rapport au sol quelle que soit la charge, elle permet de faciliter l'accès des passagers.

Quel que soit le mode de suspension utilisé, la flexibilité variable est utilisée pour assurer un confort identique à vide, en charge partielle et à pleine charge.

12.5. Climatisation et confort. — Ces deux qualités sont particulièrement poussées dans les autocars. Les sièges, avec appuie-tête, sont très proches de ceux utilisés dans les avions de lignes ; ils sont réglables en inclinaison. Ventilation individuelle, cendrier, et pochettes pour cartes, revues ou journaux sont souvent prévus.

Dans ces véhicules le chauffage utilise rarement l'eau de refroidissement du moteur. Il est indépendant, alimenté au gasoil ou au gaz liquéfié pour assurer le chauffage avant le départ ou à l'arrêt. Dans le cas d'une telle installation, une dérivation est prévue pour assurer le préchauffage du moteur et en faciliter le démarrage par temps très froid.

Par temps chaud, certains autocars de voyages comportent, en plus de la ventilation forcée utilisant l'air extérieur, une installation de conditionnement d'air frais indépendant, avec un groupe frigorifique.

12.6. Carrosserie. — Les autobus et autocars sont très fréquemment réalisés avec des caisses-poutres autoportantes, entièrement métalliques avec revêtements extérieurs en tôle d'acier ou d'alliage léger ou même en matière plastique. Seuls les autocars de grand tourisme comportent encore des carrosseries réalisées par des spécialistes à la demande de l'utilisateur. Chaque année un concours réunit en France les carrossiers, constructeurs et utilisateurs pour juger des meilleures réalisations. Ce concours juge non seulement le confort offert aux passagers, mais aussi la maniabilité, l'insonorisation, la facilité de conduite et d'entretien et la sécurité active et passive.

13. LES VÉHICULES À ESSIEUX MULTIPLES

Nous avons vu précédemment que le Code de la route, en France, impose certaines limites de charge par essieu. Il en est de même dans tous les pays. Cette limite explique le développement des véhicules à essieux multiples, 3 ou 4 pour des véhicules porteurs ; 3, 4, 5 et même 6 essieux dans le cas d'ensembles articulés tracteur-semi-remorque dans des pays tels l'Italie, la répartition étant de 3 essieux sur le tracteur et 2 et même 3 essieux sur la semi-remorque. Sur certains tracteurs, pour faciliter la circulation en courbe serrée et éviter les effets de ripage ou glissement qu'imposeraient aux pneumatiques des essieux fixes, un autre essieu que l'essieu avant est directeur, sa commande étant liée à la commande principale. Sur la semi-remorque l'un des essieux peut être autodirecteur avec blocage pour la marche arrière qui serait alors impossible si cet essieu restait libre.

Les tracteurs à trois essieux sont parfois à deux ponts moteurs pour augmenter l'adhérence utile pour la traction (quatre roues motrices au lieu de deux).

Pour les très fortes charges indivisibles, des remorques ou semi-remorques à essieux multiples peuvent atteindre une masse totale roulant de 200 tonnes et plus.

14. LES VÉHICULES TOUS CHEMINS ET TOUS TERRAINS

Il arrive fréquemment de confondre ces deux types de véhicules cependant très différents par leur utilisation et leur conception. Il est même intéressant d'ajouter un type intermédiaire destiné au déplacement en terrains variés dont les performances se situent à égales distances des deux autres genres de véhicules.

14.1. Véhicule tous chemins. — C'est fréquemment une voiture légère, modifiée, améliorée pour circuler hors des routes, mais dont les limites d'utilisation s'arrêtent aux chemins forestiers, sentiers en campagne, pistes non aménagées (la Mehari de Citroën et la 181 de Volkswagen en sont des exemples). Grâce à une garde au sol plus élevée que sur une voiture normale et dans la mesure où elles sont équipées de pneumatiques spéciaux, ces voitures peuvent circuler plus facilement sur les mauvais chemins que les voitures routières. L'absence de blocage de différentiel et de roues motrices intégrales limitent leur possibilité en terrain mou.

14.2. Véhicule pour terrains variés. — Aux possibilités de circuler sur les mauvais chemins ce véhicule ajoute celles de circuler à travers champs, dans les terres labourées ou en forêt, et sur les sols les plus mauvais, même détrempés. Ces véhicules comportent quatre roues motrices et à blocage de différentiel, donc à adhérence totale. Leur dégagement au sol leur permet de passer dans des ornières profondes (on peut citer, par exemple, les véhicules Land Rover et Häfflinger de Steyr-Puch).

Les véhicules tous terrains, eux aussi à adhérence totale, ajoutent aux qualités des précédents un couple très élevé et un fort dégagement par rapport au sol. Cela leur permet de passer dans les terrains les plus difficiles quels que soient la pente et l'état du sol. Leur effort de traction est aussi



Voiture légère
tous terrains 4 × 4
(*Rover*)

très important. Ils sont souvent à essieux multiples ou même à chenilles. Ces véhicules sont réservés aux applications militaires ou aux travaux publics.

Pour tous ces véhicules la charge utile est plus réduite en terrain qu'en utilisation routière, 50 % environ, pour réduire la pression sur le sol.

Sur les véhicules pour terrains variés et sur ceux tous terrains à roues, le pont avant moteur et le blocage de différentiel ne sont utilisés qu'en cas de nécessité et à vitesse réduite ; ainsi on limite les contraintes sur les transmissions et les difficultés de direction dues au blocage de différentiel (qui rend les roues solidaires) se trouvent réduites.

15. LES VÉHICULES SPÉCIAUX

Les véhicules routiers ou hors route sont réservés à des transports de charge portée ou tractée. Il existe d'autres applications, très nombreuses, très variées. Il n'est pas possible d'en dresser une liste complète, la variété est aussi grande que les besoins. Citons à titre d'exemple les chasse-neige, les camions porte-grue, les engins de forage automoteurs, les voitures de lutte contre l'incendie, les camions porte-bétonneuses.

15.1. Chasse-neige. — Une place à part doit être faite aux chasse-neige à étrave ou à outils rotatifs qui permettent de maintenir en état d'utilisation de nombreuses routes de montagne en période hivernale. La puissance de ces engins est très importante, elle peut dépasser 500 ch (350 kW). Dans le cas des chasse-neige à outils rotatifs la puissance motrice nécessaire au déplacement est souvent fournie par un moteur différent de l'outil déneigeur. Ces engins sont à quatre roues motrices dans la plupart des cas.

15.2. Véhicules de travaux publics. — Ces véhicules, de conception très spéciale, peuvent néanmoins être classés dans les véhicules routiers. Ils sont utilisés pour la réalisation ou la remise en état des routes et autoroutes, la construction de barrages, partout où le transport de masses importantes de terre est nécessaire.

15.2.1. Matériels de terrassement ou d'excavation. — La pelle mécanique ou excavateur est constituée par un bras ou flèche à l'extrémité duquel se trouve un godet ou pelle, commandé par câble ou vérin hydraulique ; la centrale motrice (moteur et commande) est dans une tourelle pivotante où se trouve le conducteur. L'ensemble est monté sur roues ou sur chenilles.



Chasse-neige
à turbine
(*Mercedes*)



Bulldozer hydraulique avec lame travaillant en angle (*Caterpillar*)

Le scraper monté sur roues et aidé par un véhicule pousseur sur roues ou chenilles est une benne dont la partie inférieure porte une lame pour râcler le sol; par un plan incliné elle permet le chargement de la benne par le déplacement de l'engin. Le scraper sert au transport de terre et à son épandage.

Le loader est un scraper à gros débit où la benne est remplacée par un dispositif de chargement tel un tapis roulant qui permet de charger des camions-bennes accompagnant le scraper dans son déplacement.

15.2.2. Matériel de nivelage et remblayage. — Le bulldozer est un véhicule à roues, ou à chenilles dans le cas de très fortes puissances, équipé à l'avant d'une lame en forme d'étrave. Celle-ci permet de pousser la terre vers l'avant.

L'angledozer est un engin identique au bulldozer, mais dont la lame est orientable. Cette orientation permet de pousser la terre sur la droite ou la gauche du véhicule.

Le moto-grader ou niveleuse n'est pas un véhicule de transport; il est utilisé pour aplanir le sol plus régulièrement que ne le permettent le bulldozer et l'angledozer. Les niveleuses possèdent aussi une lame de travail orientable, mais elle est placée entre les essieux avant et arrière de l'engin qui est normalement sur roues.

Tous ces véhicules sont équipés de commandes hydrauliques pour le mouvement des lames et l'assistance de la direction. Les puissances des moteurs sont importantes. Certains scrapers sont équipés de moteurs de 700 ch (500 kW) avec des transmissions automatiques ou semi-automatiques et déplacent une masse totale en charge de 100 t et plus, à des vitesses dépassant 60 km/h.

16. LES VÉHICULES DE TRANSPORT SOUS BASSE TEMPÉRATURE

Ce genre de véhicules connaît un développement très important. Grâce à eux, il est possible de transporter à travers l'Europe de la viande, des poissons, des primeurs dans les meilleures conditions de conservation.

16.1. Véhicules isothermes. — Le camion isotherme est un véhicule dont l'isolation permet de limiter les échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur. Ce type de véhicule est simplement constitué par une caisse isolante. Pendant le transport il n'y a aucun apport de froid. La caisse isolante est constituée par une armature à double paroi garnie d'une forte épaisseur de matériaux isolants qui sont maintenus par des panneaux.

16.2. Véhicules réfrigérants. — Le camion réfrigérant est un véhicule isotherme dont l'isolation et la source de froid permettent de compenser les entrées de chaleur et de maintenir à l'intérieur de la caisse, pendant un temps déterminé, une température suffisamment basse, malgré une température extérieure élevée, de 40 °C, par exemple. Ce type de véhicule possède une installation de refroidissement par glace soit hydrique, soit carbonique, suivant la température désirée (comprise entre 0 à 20 °C). Du fait que la source de froid est statique et qu'elle se détruit progressivement, la température n'est constante que pendant un certain temps puis se relève plus ou moins vite.

16.3. Véhicules frigorifiques. — Ce sont de véritables véhicules isothermes; leur isolation et leur système de réfrigération permettent de maintenir à l'intérieur de la caisse, de manière permanente, une température pratiquement constante pouvant aller jusqu'à — 20 °C, malgré les variations de la température extérieure. Ces véhicules comportent donc une installation frigorifique soit du type à compression, soit, plus rarement, du type à absorption (V. t. 2, Applications électrodomestiques de l'électricité, chap. 4). Les caisses de tous ces véhicules sont à double paroi garnie de matière isolante à très faible coefficient de déperdition thermique.

17. LES VÉHICULES AÉRÉS ET CALORIFIQUES

À côté des véhicules des chaînes du froid, existe une autre catégorie de véhicules destinés au transport des denrées horticoles ou de denrées craignant le froid (huîtres et coquillages, par exemple). Ce sont les véhicules dits « aérés » et les véhicules « calorifiques ». Les premiers sont clos, non isothermes et munis d'ouverture d'aération activée. Les seconds sont des véhicules isothermes dont l'isolation et le système de chauffage permettent de maintenir constante, de façon permanente, la température intérieure quel que soit le froid extérieur.

Dans ce genre de véhicules peuvent être classées certaines citernes sur véhicules porteurs ou semi-remorques, calorifugées, pour le transport de mazout ou de goudron. Le remplissage et la vidange (ou « dépotage ») doivent être faits à une température où le produit reste suffisamment fluide. En plus du calorifugeage ces citernes comportent un serpentin en tube métallique dans lequel peut circuler de la vapeur pour faciliter la vidange, dans certains cas, en réchauffant le produit.

18. LES VÉHICULES À SOURCE D'ÉNERGIE NON LIQUIDE

Soit par nécessité — période de guerre ou pénurie de carburant — soit par souci d'économie, les chercheurs se

sont efforcés de faire fonctionner les moteurs des véhicules avec des sources d'énergie diverses autres que l'essence et le gasoil.

Camion à gazogène. — Il convient de citer cette source d'énergie pour l'aide qu'elle a apportée en Europe de 1940 à 1945. En 1944, plus de 300 000 véhicules à gazogène circulaient en France. En 1971, il n'en existe que quelques exemplaires utilisés dans des exploitations forestières où le combustible se trouve sur place, sans valeur marchande.

Rappelons qu'au lieu d'être alimenté par un carburant liquide, le moteur est alimenté par un gaz fourni par un gazogène monté sur le châssis et utilisant le bois sec ou vert, le charbon de bois, le coke de houille ou le grain d'anthracite.

L'appareil gazogène pour véhicule industriel comprend :

— le générateur qui produit le gaz combustible ;
— le refroidisseur-épurateur ;
— le mélangeur ;
— les accessoires.

Les réactions chimiques qui se produisent correspondent aux équations chimiques suivantes :

$$\underset{\text{carbone}}{C} + \underset{\substack{\text{oxygène}\\\text{de l'air}}}{O_2} \rightarrow \underset{\text{gaz carbonique}}{CO_2}$$

puis :

$$\underset{\text{gaz carbonique}}{CO_2} + C \rightarrow \underset{\text{oxyde de carbone}}{2\,CO}$$

et :

$$C + \underset{\text{eau}}{H_2O} \rightarrow CO + \underset{\text{hydrogène}}{H_2}$$

Le mélange d'oxyde de carbone, d'hydrogène et d'azote résiduel de l'air (qui n'intervient dans aucune réaction) est le gaz pauvre.

Tous les combustibles doivent être bien calibrés, pour obtenir un rendement maximal. Le gaz produit est, soit du gaz pauvre, soit du gaz mixte, mélange de gaz pauvre et de gaz à l'eau provenant de l'eau du combustible (bois) ou d'une injection d'eau dans le gazogène. Le gaz mixte (1,2 à 1,35 kcal au mètre cube) est plus riche que le gaz pauvre (0,85 à 1 kcal). L'utilisation du gaz pauvre de gazogène dans un moteur à essence entraîne une perte de puissance notable, proche de 35 %. Le moteur doit être assez profondément modifié (augmentation du taux de compression, réalésage des cylindres, augmentation du diamètre des soupapes et de la tuyauterie d'admission) pour limiter cette perte à 20 %.

L'utilisation d'un gazogène entraîne, d'une part, un entretien journalier : vidange des refroidisseurs et condenseurs, nettoyage du foyer (scories et mâchefer), nettoyage du cendrier, d'autre part, un entretien périodique : vidange du foyer, lavage des épurateurs, vérification de l'étanchéité de l'ensemble.

Ces multiples sujétions, qui se traduisent par des dépenses importantes en main-d'œuvre, empêchent l'extension du gazogène, malgré le faible prix du combustible.

Malgré la disparition de ce moyen de production d'énergie, il est nécessaire d'en noter l'existence qui peut, sans le souhaiter, redevenir d'actualité en période d'économie difficile. Il est encore utilisé dans certains pays d'Orient et d'Extrême-Orient, l'Inde, par exemple.

19. LES CAMIONS À MOTEURS À GAZ COMPRIMÉ

Les moteurs de voiture ou de camion sous réserve de quelques modifications, peuvent fonctionner au gaz d'éclairage. Ces modifications portent sur le taux de compression qui doit être proche de 9 à 1, et sur l'allumage et le carburateur. Les premiers moteurs qui fonctionnaient dans les usines vers 1880 pour entraîner des machines-outils étaient ainsi alimentés.

L'idée est donc venue de comprimer, à haute pression, 200 daN/cm² environ, dans des bouteilles en acier, du gaz facilement transportable sur les voitures. Pendant la guerre de 1940-1945, les autobus parisiens étaient alimentés en gaz d'éclairage non comprimé contenu dans des outres en toile à ballon fixées sur le toit des autobus. Le rayon d'action était de quelques kilomètres et nécessitait une recharge à chaque extrémité de la ligne.

La découverte de gisements de gaz naturel à Vaux-en-Bugey dans l'Ain (en 1925) et plus récemment à Lacq, dans le sud-ouest de la France (en 1948), a favorisé l'utilisation du gaz comprimé en particulier dans cette région. Le rayon d'action n'étant que de 200 à 300 kilomètres, les stations de recharges se trouvent essentiellement dans la zone productrice.

Ce mode d'alimentation, malgré son intérêt, tend à disparaître car il nécessite une installation onéreuse et lourde et le rayon d'action est limité. Il est en tous cas réservé aux voitures légères, fourgonnettes et camions de 5 à 6 tonnes.

20. LES CAMIONS À GAZ LIQUÉFIÉS

Des gaz liquéfiés ont été utilisés de préférence au gaz comprimé, qui nécessite de transporter des bouteilles en acier lourdes et de recharge difficile dans des stations peu répandues. Parmi les gaz on a choisi certains hydrocarbures tels que le propane et le butane, gazeux à la température et à la pression ordinaires et qui deviennent liquides sous une pression de quelques bars. Cela permet leur emmagasinage sous un volume réduit, dans des récipients relativement légers. Les noms de gaz de pétrole liquéfiés (G.P.L.) ou L.P.G. (*Low Pressure Gas*) donnés au butane et au propane viennent du fait qu'ils peuvent être obtenus par distillation du pétrole brut.

Leur pouvoir calorifique au kilogramme est légèrement supérieur à celui de l'essence (11 kcal contre 10,5).

L'utilisation comme carburant est aisée. L'équipement du véhicule comporte :

— un réservoir éprouvé à 20 bars, par exemple, avec orifice de remplissage, tube plongeur, robinet valve de connexion à la tuyauterie conduisant l'hydrocarbure vers le moteur, et soupape de sécurité ;

— un détendeur primaire précédé d'un filtre. Ce premier détendeur abaisse la pression : il reçoit le corps sous forme liquide et le restitue sous forme de gaz sous pression (0,5 à 1 bar) ;

— un réchauffeur alimenté par l'eau du radiateur. Il a pour effet de parfaire la vaporisation du gaz après la détente primaire ;

— un détendeur secondaire qui abaisse la pression du gaz très sensiblement à la pression atmosphérique ;

— un carburateur-mélangeur qui fournit l'air carburé à la pipe d'admission.

Les gaz liquéfiés sont utilisés pour la carburation en Belgique, aux Pays-Bas, en Italie, et surtout aux États-Unis d'Amérique. Leur utilisation sera intéressante sur les véhicules équipés de turbines à gaz. En revanche, en France, leur emploi jugé dangereux dans cette application (en cas d'accident) est interdit pour la carburation.

21. LES VÉHICULES AVEC PILES À COMBUSTIBLE

Cette source d'énergie est encore du domaine de la recherche et du laboratoire. Il n'y a guère plus de 20 ans que les techniciens reparlent de ce « nouveau » mode d'énergie, que Davy au début du XIXe siècle avait envisagé ! Sir William Grove en 1839 avait réalisé une pile baptisée à l'époque batterie voltaïque à gaz. En France, en 1881 et 1900, des chercheurs dont Branly se sont intéressés à cette question.

Le développement parallèle et plus rapide des moteurs à vapeur et à explosion, des moteurs électriques et de leurs génératrices ont fait tomber la pile à combustible dans un oubli dont elle semble ressortir (V. t. 2, Autres sources d'énergie électrique).

En fait, la pile à combustible n'est pas une pile à proprement parler, mais une cellule, de forme et de matière quelconques recevant, d'une part, de l'air et d'autre part, un combustible qui peut être du charbon pulvérisé, un gaz liquéfié ou non, un hydrocarbure, du gaz de gazogène. Ce comburant et ce carburant produisent du courant continu par réaction chimique au contact d'électrodes de nature déterminée qui peuvent être elles-mêmes revêtues ou non de produits poreux, protecteurs, catalyseurs.

Ce n'est donc plus un organe de stockage d'électricité comme l'est une pile de poche ou un accumulateur de voiture mais une centrale de production de courant.

Vers 1960, un tracteur agricole de 35 ch (25 kW), réalisé par Allis Chalmers aux États-Unis d'Amérique a fonctionné parfaitement avec une telle pile à combustible. À la même époque il en a été de même d'une voiture Chrysler.

Malgré leur rendement élevé, leur facilité d'utilisation et d'alimentation, ces piles ne sont encore que peu utilisées pour des questions de prix de revient. Les impératifs de la lutte anti-pollution ont donné un regain d'intérêt à la pile à combustible qui est « propre », et les recherches pour en diminuer le prix, peuvent amener des réussites et des surprises dans son utilisation courante.

22. LES VÉHICULES À CHENILLES

Le véhicule à chenilles est connu pour sa capacité d'évolution en terrain mou et pour son effort de traction. Il mérite de ce fait une place à part dans la famille des véhicules industriels.

Lorsqu'un véhicule à roues passe sur un sol peu consistant — neige, sable, terre fraîchement labourée, sol humide, marécage — on constate que les roues s'enfoncent parce que la surface d'appui des roues sur le sol est trop faible. Pour résoudre le problème, on a imaginé le véhicule à chenilles.

Le véhicule à chenilles se déplace en roulant sur ses propres chemins de roulement qu'il fait avancer de façon égale au fur et à mesure de sa progression. Chacun des chemins de roulement est large, de façon à obtenir une pression sur le sol très faible. Il est constitué par une chaîne sans fin ou chenille, composée de patins rectangulaires articulés les uns par rapport aux autres, ce qui permet à la chenille de se déformer pour épouser les bosses du terrain. La face inférieure des patins est munie de nervures ou de blocs de caoutchouc qui pénètrent dans le sol et donnent des points d'appui solides qui s'opposent au glissement. La face supérieure porte une ou deux nervures formant rails sur lesquels roulent des galets fous sur leurs axes. Les galets sont rassemblés par groupe de deux, trois ou quatre pour former un chariot, et ces chariots supportent le châssis du véhicule par l'intermédiaire des ressorts de suspension. En outre, ils sont articulés pour suivre les déformations de la chenille.

La chenille est liée au châssis de la façon suivante : à l'extrémité des demi-arbres du pont arrière du véhicule il y a une roue dentée ou barbotin qui vient s'engrener avec les axes d'articulation qui réunissent deux patins. La distance entre deux axes constitue le pas de la chenille. Le barbotin prend appui sur l'axe pour pousser le véhicule, et il entraîne cet axe puis le suivant dans son mouvement de rotation, ce qui oblige la chenille à avancer. À l'avant la chenille est supportée par une roue folle dite poulie de renvoi. En outre, des petits galets solidaires du châssis soutiennent le brin supérieur de la chenille. La pression au sol varie selon l'application de 0,1 à quelques décanewtons par centimètre carré.

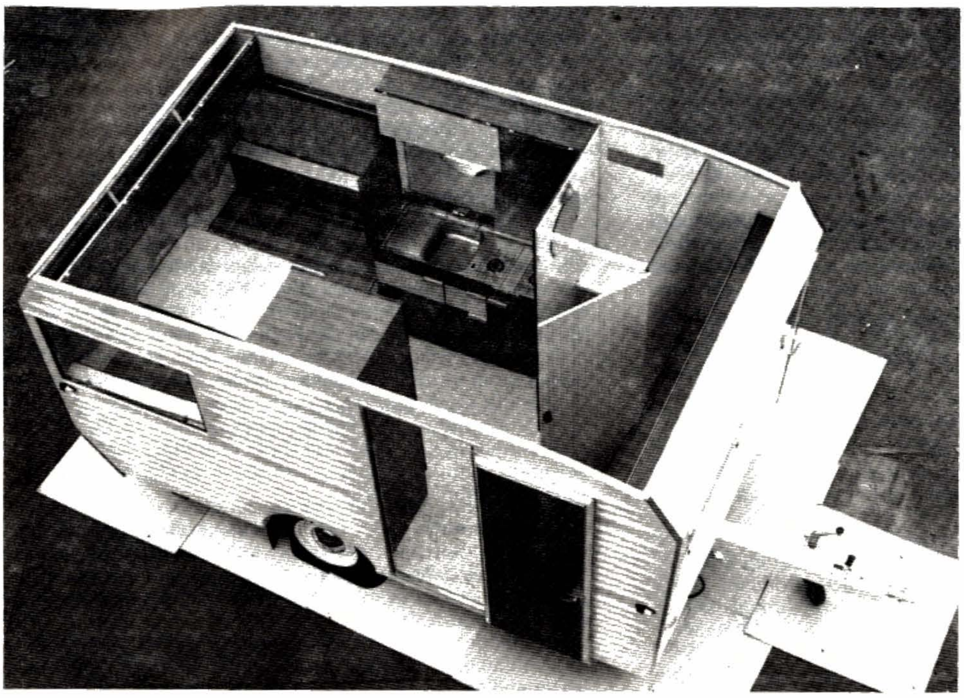
22.1. Direction. — Les tracteurs à chenilles reposent entièrement sur deux chenilles : chenille droite et chenille gauche. Les véhicules spéciaux, dits half-tracks, comportent un essieu avant directeur à roues et deux chenilles de propulsion à l'arrière.

La direction des véhicules chenillés est différente de celle des véhicules à roues. Il ne peut être question de braquer les chenilles, on se contente de leur donner des vitesses différentes en freinant ou en débrayant le barbotin de la chenille autour de laquelle on veut virer.

22.2. Applications. — Les applications des chenilles sont nombreuses en particulier sur certains véhicules militaires (chars de combat, tracteurs, véhicules d'infanterie portée, etc.), sur des tracteurs agricoles et des véhicules spéciaux de travaux publics.



Véhicule utilisé en Terre Adélie (*R. Guillard-Expéditions polaires françaises*)



Intérieur d'une caravane, toit enlevé (*ACC*)

23. LES VÉHICULES AMPHIBIES

Ces véhicules permettent de circuler en mauvais terrain et de traverser des lacs ou des fleuves, de circuler dans les marais. Ils rendent des services considérables dans les applications militaires et certaines utilisations civiles (missions polaires par exemple).

Le déplacement au sol de ces véhicules est assuré par des roues ou des chenilles; la propulsion dans l'eau peut se faire par les roues ou les chenilles ou par une hélice entraînée par une prise de force indépendante.

Les moteurs, transmissions, suspensions qui les équipent sont souvent identiques à ceux de véhicules routiers ou tous terrains normaux. Leur originalité réside dans la caisse formant châssis qui doit assurer une grande rigidité lors du déplacement en mauvais terrain, une flottabilité suffisante en charge et une étanchéité parfaite (cela est facilité par la rigidité de la caisse).

24. LES CARAVANES

Le développement des loisirs et du tourisme, le goût de l'indépendance et une certaine difficulté à se loger en période de vacances sont certains éléments — il en existe d'autres — qui sont à l'origine du développement spectaculaire des caravanes.

La plupart de ces remorques sont à un seul essieu et d'une masse n'excédant que rarement 1 200 kg pour pouvoir être tractées par les voitures particulières.

Au-delà de 750 kg de masse totale roulant, elle nécessite un permis et un dispositif de freinage spéciaux.

La fabrication utilise des matériaux très divers (acier, alliage léger, matière plastique, bois, contreplaqué, etc.), le but visé étant le maximum de légèreté et de résistance.

Les constructeurs ont mis au point des caravanes extrêmement séduisantes et confortables. Certaines remorques sont prévues pour résister aux grands froids ce qui en permet l'utilisation dans les régions de sports d'hiver.

CHAPITRE XXVI
TRACTEUR ET MACHINES AGRICOLES

TRACTEUR AGRICOLE

1. INTRODUCTION

Le machinisme agricole est l'un des facteurs essentiels de la révolution agricole du XXe siècle; commencée en Europe vers 1920, antérieure de quelques années aux États-Unis d'Amérique, cette dernière peut, avec tous les dangers d'un raccourci, se ramener à deux facteurs :

— une diminution des surfaces cultivées, avec une régression de la population active agricole et une restructuration plus ou moins poussée suivant les pays ;

— un progrès agronomique énorme, qui a engendré une augmentation *conséquente* de la productivité agricole ; ce progrès s'est manifesté par la sélection de variétés productives, adaptées aux différents climats, par la maîtrise des problèmes culturaux, des problèmes de fertilisation, de la protection des végétaux, etc., de la sélection des races animales, de leur état sanitaire, etc.

Tout cela est bien entendu lié aux problèmes économiques, en particulier à la distribution des masses produites et n'aurait pas été possible sans la mécanisation et la motorisation de tous les systèmes de productions agricoles.

Certes, la mécanisation se poursuit depuis longtemps (les Gaulois avaient fabriqué une moissonneuse-gerbeuse et des moulins à huile) mais elle n'a pris son vrai départ qu'avec la motorisation. Le moteur thermique qui permet de fournir de l'énergie à toutes sortes de machines capables d'effectuer des travaux à la place de l'homme (tout au moins en partie) est le véritable facteur moteur de l'industrialisation de l'agriculture. En attendant d'aller vers l'automation du domaine agricole, la mécanisation et la motorisation sont les manifestations les plus spectaculaires de la mutation de l'agriculture moderne.

Date	Population totale française	Population agricole active	
		nombre	%
1789	27 000 000	5 300 000	60
1906	41 100 000	8 770 000	42,3
1921	39 200 000	8 950 000	41,2
1936	41 900 000	7 170 000	35,2
1950	42 000 000	6 500 000	31,2
1954	42 800 000	5 007 000	26,0
1962	47 700 000	3 850 000	20,6
1965	49 000 000	3 400 000	17,5
1970	50 000 000	2 850 000	13,9
1985	60 000 000	2 000 000	8,7

Le tableau ci-dessus montre l'évolution de la population agricole active par rapport à l'ensemble de la population française ; cette évolution semble irréversible et d'après les techniciens ne s'arrêtera que lorsque le monde rural ne représentera plus que sept pour cent (7 %) de la population active totale. Cette évolution est liée à la motorisation, l'une ayant provoquée l'autre, sans que l'on sache trop encore quel est l'effet et la cause.

2. GÉNÉRALITÉS SUR LE TRACTEUR ET LES ENGINS DE TRACTION AGRICOLES

Aujourd'hui, aucune exploitation, même de taille moyenne, ne peut se concevoir sans tracteur; il est le symbole du progrès technique et social en agriculture. En quarante ans il a conquis le domaine rural, malgré son prix et malgré la lenteur de la vulgarisation en France.

2.1. Évolution du parc français de tracteurs agricoles de 1867 à 1970

1° *Avant la seconde guerre mondiale :*

1867	Quelques appareils à vapeur
1879	Époque du « labourage électrique » au travail.
1905	Apparition des premiers tracteurs munis de moteurs à combustion interne.
1918-1919	Premier « faux départ » de la motorisation : environ 2 500 tracteurs, à *roues en fer,* sont en service dans les très grosses exploitations.
1929-1930	Point de départ véritable de la motorisation grâce à l'emploi du « pneu agraire » Parc : environ 25 000 tracteurs.
1939	35 000 tracteurs.

2° *Après la seconde guerre mondiale* (*en début d'année*) *:*

1945	1949	1952	1955	1957	1959	1961	1963
37 000	95 000	165 000	270 000	420 000	620 000	765 000	900 000

1965	1966	1968	1969	1970	1971	1972	1973
1 000 000	1 110 000	1 190 000	1 205 000	1 290 000	1 305 000	1 312 000	1 340 000

2.2. Comparaisons avec d'autres pays

En prenant le nombre d'hectares de terres labourables (notion difficile à définir, mais qui représente environ 54 % de la surface agricole utile en France), on a pu établir le tableau suivant :

	1960	1964	1965	1966	1967	1968	1969
Hectares de terres labourables par tracteur en France	26	19	18	17	16,5	14,8	14,6

Notons que la surface de terres labourables qui s'était stabilisée autour de 19 millions d'hectares pour la période 1960-1967, a légèrement régressée puisqu'elle n'est plus que de 17,6 millions d'hectares actuellement sur 32 millions d'hectares de surface agricole utilisée (S.A.U.).

2.3. Évolution du parc dans les pays membres de l'O.C.D.É. en milliers de tracteurs. — Il est intéressant de comparer le parc de tracteurs en France avec ceux des pays membres de l'O.C.D.É. ; le nombre de tracteurs pour mille hectares de terres arables donne une idée de l'état de motorisation du pays. Encore faut-il nuancer cela : en effet, plus les structures agricoles sont regroupées, plus la puissance du moteur du tracteur moyen est élevée.

Pays	1955	Moyenne 1955-1960	Moyenne 1960-1965	1968	Nombre de tracteurs par 1 000 hectares de terres arables
Allemagne	462	620	990	1 298	164
Autriche	50	78	148	229	143
Belgique	23	32	52	81	95
Canada	480	508	558	617	16
Danemark	58	76	136	176	65
Espagne	26	35	93	215	14
États-Unis d'Amérique	4 480	4 605	4 734	4 810	26
Finlande	38	59	97	140	51
France	333	522	892	1 190	67
Grèce	9	14	26	59	20
Irlande	29	34	49	72	62
Islande	4	5	6	9	—
Italie	148	187	308	560	48
Japon	—	—	—	124	23
Luxembourg	4	5	6	8	121
Norvège	32	38	59	82	97
Pays-Bas	37	60	76	110	125
Portugal	4	6	12	19	6
Royaume-Uni	422	442	467	470	63
Suède	135	155	202	260	86
Suisse	31	37	56	68	184
Turquie	40	42	46	85	4
Yougoslavie	12	21	40	44	6
Total O.C.D.É.	6 819	7 527	8 967	10 721	31

2.4. Évolution des ventes en France (tracteurs à roues et tracteurs à chenilles). — Nous avons pu chiffrer, pour les vingt-cinq dernières années, les ventes de tracteurs neufs qui ont été faites en France ; le marché d'occasion est très flou mais représente un problème grave au point de vue commercial.

Année	Construction française	Importation	Total	Occasions
1945	850	6 950	7 100	
1950	9 500	13 000	22 500	
1954	35 800	7 500	4 800	
1955	58 900	7 500	66 400	
1956	72 600	19 700	92 300	
1957	86 600	23 500	11 100	
1958	79 600	14 200	93 800	48 000
1959	65 200	12 500	77 700	59 000
1960	55 000	17 800	72 800	65 500
1961	55 600	24 000	79 600	61 100
1962	46 800	24 500	71 300	65 000
1963	48 100	29 500	77 600	
1964	49 228	32 968	82 196	
1965	44 584	28 728	73 312	
1966	47 834	34 437	82 271	
1967	47 850	32 234	80 184	
1968	45 462	35 107	80 569	
1969	45 500	35 175	80 675	
1970	38 800	27 400	66 200	
1971	37 700	29 000	66 700	
1972	41 000	30 400	71 400	

2.5. Évolution des ventes par catégories de puissance (en pourcentage). — Le tableau, concernant les ventes par catégories de puissance pour les tracteurs à roues, permet de voir que la puissance des moteurs équipant les tracteurs a tendance à augmenter. Cela ne veut pas dire que l'on vend beaucoup de tracteurs ayant des puissances supérieures à cent chevaux (735 kW) : cela veut dire que la puissance du tracteur moyen est passée de trente-cinq chevaux il y a dix ans à cinquante actuellement.

	Puissance	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
Tracteurs à roues	< 15 ch	4,1 %	3,4 %							
	15 à 20 ch	6,1 %	3,5 %	8 %	6 %	4 %	2,8 %	2,7 %	2,6 %	2,6 %
	20 à 25 ch	10,9 %	8,9 %							
	25 à 35 ch	35,9 %	28,7 %	21 %	20 %	16 %	7,5 %	6,1 %	7,4 %	5,5 %
	35 à 50 ch			50 %	48 %	44 %	44,8 %	43,2 %	38,1 %	30,9 %
	50 à 65 ch	43 %	55,5 %	20 %	22 %	25 %	30,7 %	28,4 %	29 %	35,3 %
	65 à 80 ch			1 %	4 %	11 %	14,2 %	19,6 %	22,9 %	25,7 %

2.6. Ventes en pourcentages par carburant

	1955 %	1956 (1) %	1957 %	1958 %	1959 %	1960 %	1961 %	1962 %	1963 %
Essence ou pétrole	50,5	41,6	16,8	10,1	5,2	4,8	2,5	2,2	3,2
Fuel-oil domestique	49,5	58,4	83,2	89,9	94,8	95,2	97,5	97,8	96,8

(1) En réalité, 40,6 et 59,4 % compte tenu de la transformation en diesel de certains matériels importés à essence.

	1964 %	1965 %	1966 %	1967 %	1968 %	1969 %	1973 %
Essence ou pétrole	3,2	3			1		
Fuel-oil domestique	96,8	97			99		

Remarques : Si la vente des tracteurs à chenilles sur le marché français n'a jamais dépassé 2 % (elle est de 0,9 % pour 1969), le pourcentage de ces tracteurs équipés de moteurs à essence est de 22 pour 100.

Ce dernier tableau permet de voir que presque tous les tracteurs agricoles à roues sont équipés de moteur Diesel. Seuls quelques tracteurs de faible puissance, roulant un nombre d'heures très limité dans l'année pour effectuer des travaux légers ou des transports, sont équipés de moteur à essence.

Un nouveau marché s'est créé sur les micro-tracteurs; il a porté sur 3 088 unités en 1968 et 3 456 unités en 1969, soit une augmentation de douze pour cent ; trente-huit pour cent ont une puissance inférieure à neuf chevaux (7 kW) et quatre-vingt-onze pour cent sont équipés de moteurs à essence.

3. LE TRACTEUR AGRICOLE ET SON UTILISATION

Un tracteur agricole est un véhicule automoteur propre à fournir de l'énergie mécanique sous diverses formes :
— à poste fixe,
— en traction,
— en utilisation mixte.

3.1. Les facteurs d'efficacité et les moyens

3.1.1. Les facteurs d'efficacité. — De nombreux facteurs entrent en jeu pour obtenir une efficacité optimale dans l'utilisation de l'engin de traction. Ce sont :

1° Les caractéristiques du moteur : puissance nominale (puissance maximale du moteur pour son régime normal d'utilisation) et consommation spécifique, qui déterminent un problème économique.

2° Les caractéristiques de l'ensemble moteur et châssis :

— la masse totale,
— l'empattement, la voie,
— la répartition des charges statiques, la position du centre de gravité,
— les caractéristiques des roues et des pneus,
— la conception de la liaison entre le tracteur et l'outil de travail.

3° Les caractéristiques du terrain qui déterminent les coefficients d'adhérence et de roulement.

4° Les impératifs découlant de la nature de l'outil et du travail à obtenir.

Le tracteur est un engin de traction ; le moteur, par l'intermédiaire des transmissions, permet d'obtenir de l'énergie appliquée aux roues ; celles-ci, par appui sur le sol, permettent l'avancement du tracteur et de l'outil.

Si l'effort résistant subi par l'ensemble est trop important, deux choses peuvent se produire :

— le moteur cale : cela veut dire que le tracteur est suffisamment adhérent mais que le moteur manque de puissance.
— le tracteur patine : cela veut dire que le moteur est suffisamment puissant mais que le tracteur n'adhère pas assez.

Pour un tracteur déterminé, l'adhérence caractérise la facilité de se déplacer sur un sol donné en exerçant un effort de traction. Or, la puissance du moteur est égale à :

$$P = \frac{Cn}{716}$$

C étant le couple moteur en mètres-décanewtons et *n* la vitesse de rotation en tours par minute.

Il existe donc deux possibilités pour utiliser le tracteur :

— soit obtenir un grand effort à faible vitesse,
— soit exercer un faible effort à grande vitesse.

Les comportements limites du tracteur en découlent :

— Plus la vitesse d'avancement sera réduite (cela en choisissant un rapport adéquat dans la boîte de vitesses), plus il sera possible d'exercer un effort important (jusqu'aux limites d'adhérence du tracteur car, ensuite, le tracteur patinera).

— Plus la vitesse d'avancement sera élevée, moins grande sera la latitude d'accroissement de l'effort résistant sans que toute la puissance du tracteur soit sollicitée ; au-delà, le moteur calera.

Autrement dit, à grande vitesse, en traction pure, on peut tirer parti de toute la puissance du tracteur ; à faible vitesse, le tracteur patinera avant que le moteur ne cale.

3.1.2. Les moyens. — Tout cela permet de déterminer quelques indications générales en vue de l'utilisation d'un tracteur.

1° Pour chaque tracteur, il existe une vitesse critique de traction permettant de concilier au mieux l'utilisation de la puissance du moteur et les caractéristiques d'adhérence du tracteur.

2° Pour une puissance de moteur déterminée les tracteurs légers doivent, en traction, être utilisés à grande vitesse.

3° Les boîtes de vitesses qui équipent les tracteurs doivent posséder un grand nombre de rapports, classés en gamme en vue d'utilisations différentes.

4° La liaison entre le tracteur et l'outil doit être rigoureusement étudiée de manière que l'outil ne déséquilibre pas constamment le tracteur et, au contraire, que l'on puisse utiliser les réactions du sol sur l'outil pour améliorer l'équilibre et l'adhérence du tracteur.

5° On peut améliorer l'adhérence du tracteur en agissant sur quelques facteurs simples :

— la position des roues ;
— les dimensions des pneus : les pneus larges et de grand diamètre sont plus adhérents ;
— les dessins des barrettes des pneus et la pression de gonflage ;
— la masse du tracteur : on peut l'augmenter par adjonction de masses sur les roues ou le bâti ou en gonflant les pneus à l'eau (remplissage au 2/3 du maximum, la pression de gonflage restant la même) ;
— la répartition statique de la masse du tracteur sur les deux essieux, par exemple ;
— l'utilisation de dispositifs spéciaux d'adhérence : roues cages, chenilles.

Dans une situation donnée, si les roues sont dans des conditions d'adhérence très différentes, le blocage de différentiel et le freinage indépendant sur chaque roue motrice permettent d'utiliser toute l'adhérence possible.

3.2. Utilisation de la puissance *P* fournie par le moteur. — Si nous appelons *P* la puissance fournie par le moteur thermique du tracteur (rappelons que le rendement thermique d'un moteur à essence est voisin de 0,25 et celui d'un moteur Diesel de 0,35), il est intéressant de savoir ce qu'est devenue cette puissance et ce qu'il en reste au niveau de l'attelage.

Il se produit des pertes de puissance à différents niveaux sur le tracteur.

Si nous appelons :

P_e : la puissance disponible à l'embrayage,
P_t : la puissance absorbée par les transmissions,
P_m : la puissance disponible aux roues motrices,
P_p : la puissance disponible à la prise de force du tracteur,

nous pouvons écrire :

$$P_e - P_t = P_m + P_p \qquad (1)$$

avec, en général : $P_e \leqslant \frac{99}{100} P$

Par ailleurs, nous désignons par :

P_r : la puissance absorbée par la résistance au roulement,
P_y : la puissance absorbée par le poids du tracteur,
P_g : la puissance absorbée par le glissement des roues du tracteur,
P_c : la puissance disponible à l'attelage,

D'où :

$$P_m = P_r + P_y + P_g + P_c \qquad (2)$$

Soit, en reportant dans l'expression (1) :

$$P_e = P_t + P_r + P_y + P_g + P_c + P_p \qquad (3)$$

Nous ne considérerons ici que le cas de la traction pure, sans utilisation de la prise de force du tracteur et donc :

$$P_p = 0$$

Le rendement du tracteur est toujours tel que :

$$P_c \leqslant \frac{60}{100} P$$

La puissance absorbée par les transmissions est telle que $P_t \leqslant \frac{4}{100} P$; cette perte de puissance augmente avec la vitesse par l'effet du brassage de l'huile.

Le rendement η_t des transmissions est égal à :

$$\eta_t = \frac{P_m}{P_e} = \frac{P_r + P_g + P_y + P_c}{P_e}$$

Si *F* est l'effort de traction à la jante et *U* la vitesse périphérique des roues motrices, nous pouvons aussi écrire :

$$P_m \approx \frac{FU}{75}$$

si nous exprimons *F* en décanewtons, *U* en mètres par seconde et P_m en chevaux-vapeur (1 ch = 736 W).

C'est au niveau du contact roue-sol que les pertes de puissance sont les plus importantes ; le bilan des puissances peut s'exprimer ainsi :

$$\begin{array}{ccccccc} P & \rightarrow & P_e & \rightarrow & P_m & \rightarrow & P_c \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ 100 & & 99 & & 95 & & 60 \end{array}$$

Ces pertes de puissance sont dues essentiellement à deux phénomènes : le glissement et le roulement.

3.2.1. Le glissement. — Il s'agit ici du glissement d'une roue motrice sur sa voie, et non du frottement de glissement (cela est d'ailleurs aussi vrai pour les chenilles).

Lors du déplacement d'un tracteur, pour un nombre de tours de roue déterminé, alors que la distance parcourue devrait être l_0 (en mètres) elle n'est égale qu'à l toujours inférieure à l_0.

La roue a glissé sur le sol car l'adhérence n'était pas parfaite. Ce glissement est caractérisé par un coefficient *g* :

$$g = \frac{l_0 - l}{l_0}$$

Si v_0 est la vitesse théorique d'avancement et v_i la vitesse réelle nous pouvons aussi écrire :

$$g = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad \text{soit : } v = v_0\,(l - g)$$

Les causes du glissement sont :

— les déformations du pneu et du sol,
— le glissement du pneu sur la voie de roulement,
— le cisaillement du sol par glissement des couches de terrains les unes sur les autres. À la limite la roue tourne sans faire avancer le tracteur : c'est le patinage total.

Essayons d'analyser le fait (fig. XXVI-1). Lorsque la roue motrice tourne, grâce au couple appliqué sur son axe elle exerce une action $\overrightarrow{R_T}$ sur le sol. La réaction $\overrightarrow{R_S}$ du sol, opposée à l'action motrice, est dirigée dans le sens de l'avancement et, sans cette réaction, le tracteur n'avancerait pas. Si l'on exerce un effort croissant $\overrightarrow{Q}$ avec le tracteur, pour qu'il y ait mouvement il faut que la réaction du sol croisse ; c'est ce qui se passe mais simultanément le glissement *g* augmente.

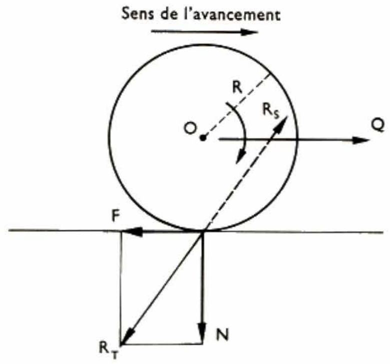


Fig. XXVI-1

Les courbes 1 et 2 (fig. XXVI-2) correspondent aux cas normaux, la courbe 3 à un sol indéformable; g croît avec $\vec{Q}$ pour un terrain déterminé. À la limite le véhicule reste immobile, il y a patinage total, bien que l'effort soit exercé en permanence.

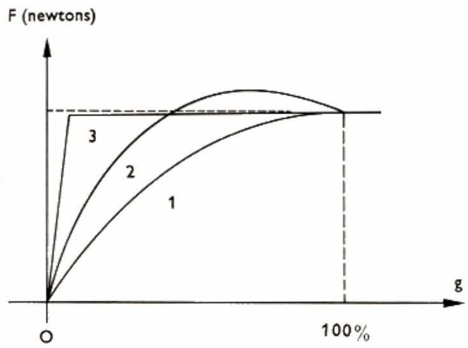


Fig. XXVI-2

À partir d'une certaine valeur du glissement l'effort de traction $\vec{F}$ reste constant ou même diminue parfois : c'est la limite de patinage. Tout accroissement de l'effort résistant à partir de cette limite entraîne un glissement de cent pour cent.

Quoi qu'il en soit, l'effort maximal qui puisse être exercé est tel que :

$$F\ max = f.N$$

$\vec{N}$ étant la charge verticale exercée par la roue sur le sol et f étant le coefficient d'adhérence ou de frottement; f varie entre 0,3 et 0,8 ; avec un tracteur déterminé l'effort ne peut être supérieur à 0,8 fois le poids du véhicule.

En travail il y a toujours du glissement, mais il doit rester faible, sinon l'ensemble est peu économique; il est de l'ordre de trente pour cent avec les tracteurs à roues, plus faible avec les tracteurs à chenilles.

Les facteurs influents sont:
— le poids du tracteur,
— les formes et les dimensions des surfaces en contact (d'où l'intérêt de l'étude des pneumatiques, par exemple),
— la nature et l'état de la surface portante.

3.3.2. Le roulement. — Lorsqu'une roue repose sur le sol (fig. XXVI-3), elle exerce sur celui-ci une force $\vec{P}$; la réaction du sol peut être assimilée à une force verticale à la distance δ de $\vec{P}$.

Pour faire rouler la roue il faut vaincre un certain couple C_r, appelé couple de résistance au roulement et tel que :

$$C_r = \delta.P$$

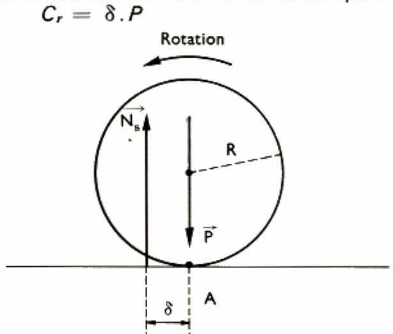


Fig. XXVI-3

Dans le cas d'une force horizontale exercée au niveau de l'axe de la roue, la résistance au roulement est égale à :

$$F = \frac{\delta}{R}\,P = f_r.P$$

(R : rayon de la roue).

f_r est appelé coefficient de roulement et a souvent une valeur constante.

Tout se passe comme si la réaction verticale du sol $\vec{N_S}$, égale et opposée à $\vec{P}$, s'exerçait en avant de A à une distance égale à δ qui caractérise la résistance au roulement:

$$C_r = \delta.N_S$$

C_r représente un couple supplémentaire que le moteur doit vaincre. La force motrice F est diminuée d'une force F_1 telle que :

$$F_1 = \frac{\delta}{R}.N_S$$

Les facteurs qui peuvent faire varier la résistance au roulement sont le poids, la pente, la direction de la ligne de traction, la hauteur du point d'attelage qui détermine un report de poids plus ou moins important de l'avant vers l'arrière du tracteur. Le tableau ci-après donne quelques valeurs indicatives du facteur (coefficient) de roulement en fonction de la nature du sol (f_r exprimé en pour cent).

	béton	chemin rural	prairie	chaume	sable	terre humide
f_r	1,5	3 à 4	5	5 à 6	90	35

On peut remarquer que d'une façon générale, si l'on diminue le glissement, on augmente les pertes par roulement ; il faut donc adopter une solution de compromis.

En fonction des pertes de puissance dues au glissement et au roulement il est intéressant de connaître la relation qui existe entre la puissance au crochet et la puissance à l'essieu des roues motrices.

En adoptant les mêmes notations que précédemment, écrivons que le couple moteur est égal à la somme du couple de résistance au roulement C_r et du couple résistant appliqué à l'essieu :

$$C_m = C_r + (F.R)$$

Si n_r est la vitesse de rotation des roues en tours par minute, la puissance à l'essieu moteur exprimée en chevaux-vapeur est égale à (les couples étant exprimés en décanewtons-mètres) :

$$P_m = \frac{C_m\,n_r}{716} = \frac{C_r + (F.R)}{716}\,.\,n_r$$

Le terme $\frac{C_r.n_r}{716}$ correspond à une perte de puissance due à la résistance au roulement.

En fonction de l'effort moyen (mesuré au dynamomètre) et de la vitesse V d'avancement réel, la puissance au crochet est donnée par la relation suivante:

$$P_c = F\,\frac{V}{75} = \frac{F}{75}\,.\,V_0\,(1 - g)$$

$$= \frac{F.V_0}{75} - g\,\frac{F.V_0}{75}$$

P_c est fournie en chevaux-vapeur si nous exprimons F en décanewtons et V en mètres par seconde. Le terme $g\,\frac{F.V_0}{75}$ représente la perte de puissance due au glissement.

La vitesse théorique d'avancement étant égale à :

$$V_0 = 2\,\pi\,\frac{n_r.R}{60}$$

alors: $$P_c = (1 - g)\,\frac{F.R.n_r}{716}$$

soit: $$P_c = (1 - g)\left(P_m - \frac{C_r.n_r}{716}\right)$$

avec n_r en tours par minute, R en mètres et P_m en chevaux-vapeur.

Cela montre que la puissance au crochet peut s'annuler dans deux cas :

(1) $g = 1$, c'est le patinage total, le tracteur n'avance plus.

(2) $\frac{C_r \cdot n_r}{716} = P_m$: le tracteur ne peut plus exercer d'effort, toute sa puissance est nécessaire pour l'avancement.

3.3. Technologie du tracteur. — Les organes mécaniques qui équipent les tracteurs sont classiques. Des améliorations très importantes ont été réalisées ces dernières années en particulier au niveau des transmissions, des prises de forces et de l'ensemble attelage et relevage.

Les moteurs sont en général du type Diesel ; dans la plupart des cas ce sont des moteurs où les cylindres sont disposés en ligne, quelquefois en V ou à plat. Les quelques moteurs à essence qui sont vendus équipent de petits tracteurs destinés à rouler un nombre d'heures très faible par an pour effectuer des manutentions et des transports légers. Ces moteurs ont en général une cylindrée importante par rapport à la puissance développée ; leur régime nominal est en général assez faible, entre 2 000 et 3 000 tours par minute. Ils ont tous actuellement un système de graissage par pression ; la majorité de ces moteurs sont refroidis par des systèmes utilisant l'eau comme fluide intermédiaire ; le refroidissement par l'air, sans intermédiaire, ne représente que 15 % des moteurs en service ; cependant, pour certains constructeurs, 40 % de leur production est à refroidissement par air.

En ce qui concerne le système d'injection, on dispose actuellement de matériaux qui permettent de construire des pompes rotatives dont la tenue à l'usure et la précision sont équivalentes de celles des pompes à pistons ; cela permet d'avoir un seul corps de pompe avec un distributeur rotatif comportant un nombre de sorties correspondant au nombre de cylindres du moteur. L'intérêt vient surtout du fait que le prix de revient est environ trois fois plus faible que pour une pompe à corps multiples à pistons.

L'injection se fait de plus en plus directement, dans le haut du cylindre ; les systèmes à chambres auxiliaires d'injection (précombustion, turbulence, réserve d'air) tendent à disparaître. Mais très souvent, l'injection directe se fait dans une chambre de turbulence creusée dans la tête du piston. Le rendement de ces moteurs est très bon. Le démarrage à froid est facile mais le fonctionnement est souvent rude. La pression d'ouverture des injecteurs est très élevée : entre 200 et 250 bars.

Le châssis est souvent constitué par l'ensemble rigide du carter support du moteur, de celui des transmissions, et du bloc de relevage. Il est quelquefois renforcé par des longerons indéformables.

3.3.1. Les transmissions. — Sur un tracteur moderne l'embrayage est souvent un organe plus complexe que sur un véhicule automobile ordinaire ; en effet, c'est à ce niveau que doit se faire la transmission de la puissance du moteur à la boîte de vitesses, d'une part, et à la prise de force, d'autre part, avec possibilité de désaccoupler les deux ensembles du moteur. Si l'embrayage est à un seul disque, classique, et que la prise de mouvement de la prise de force se fait entre l'embrayage et la boîte de vitesses, les mouvements d'avancement du tracteur et de rotation de la prise de force sont liés ; mais il peut être intéressant de pouvoir commander indépendamment le mouvement de la prise de force et celui de l'avancement du tracteur. L'embrayage du type « matrot » est composé de deux disques rapportés dans la même cloche d'embrayage et portés par deux arbres concentriques, l'un commandant la boîte de vitesses, l'autre la prise de force. La commande permet, dans un premier temps, d'arrêter l'avancement du tracteur sans arrêter la prise de force, dans un deuxième temps d'arrêter la prise de force. Mais on ne peut faire l'inverse ; cette semi-indépendance donne satisfaction dans bien des cas, par exemple, pour dégorger une machine qui bourre (presse-ramasseuse sur andain trop large), mais elle se révèle aussi insuffisante, par exemple, lorsqu'il faut virer court en bout de parcelle avec une machine entraînée par l'intermédiaire d'un joint de cardan. Pour éviter de casser celui-ci, il faudrait pouvoir arrêter la prise de force sans arrêter le tracteur. Cette indépendance totale ne peut-être obtenue que par deux embrayages distincts (système américain) ou par un système à deux disques, proche du matrot, mais avec deux commandes distinctes, ce qui prend moins de place.

Notons que le régime de rotation des prises de force est normalisé : il doit avoir un régime constant pour le régime nominal du moteur (correspondant à la puissance maximale à pleine charge). Il existe actuellement deux régimes normalisés :

$$540 \pm 10 \text{ tours à la minute} \quad (1)$$
$$1\,000 \pm 20 \text{ tours à la minute} \quad (2)$$

Par ailleurs, il est intéressant d'avoir un régime de prise de force proportionnel à la vitesse d'avancement du tracteur pour certain travaux d'épandage, par exemple. La plupart des tracteurs ont deux possibilités : prise de force à régime normalisé à 540 tours à la minute et à régime proportionnel à l'avancement ; quelques-uns ont la troisième possibilité du régime normalisé à 1 000 tours par minute.

Notons que, si le diamètre de la prise de force et le nombre de cannelures sont normalisés, la position sur le bâti du tracteur, à l'arrière, ne l'est pas, ce qui peut poser des problèmes pour l'entraînement de certaines machines. Quelques tracteurs possèdent des prises de force latérales, ce qui permet d'avoir des outils attelés sur le côté, à hauteur du conducteur ; celui-ci peut ainsi surveiller le travail (barre de coupe) sans avoir un ensemble bâti et entraînement complexe pour aller prendre le mouvement à l'arrière du tracteur.

Les boîtes de vitesses des tracteurs sont en général du type classique ; leur calcul se fait à partir de trois données :

— L'adhérence du tracteur ne permet pas d'exercer à la roue un effort supérieur à quatre-vingts pour cent du poids environ ; cela permet donc de déterminer l'effort maximal que peut développer le tracteur au niveau des roues.

— Pour éviter l'usure rapide du moteur, il est nécessaire de lui faire développer un couple égal à quatre-vingts pour cent du couple maximal possible ; cela permet d'avoir une autre expression du couple maximal possible au niveau des roues. À partir de ces deux données, on calcule le premier rapport de la boîte de vitesses.

— Si l'effort résistant, ou la charge subie par le tracteur, devient inférieur à cinquante pour cent de l'effort maximal possible, le rendement cesse d'être intéressant.

Il faut alors passer à une combinaison de vitesse supérieure de manière à faire travailler le moteur dans la zone comprise entre cinquante et quatre-vingts pour cent de la charge maximale ; on peut ainsi calculer les autres combinaisons de la boîte. On établit ainsi une gamme théorique où toutes les combinaisons se déduisent les unes des autres dans une progression géométrique de raison 1,6. À partir de là, on détermine la valeur des rapports de la gamme pratique :

— La première vitesse n'est pas toujours celle qui donne le couple maximal disponible aux roues ; très souvent c'est une vitesse « rampante » utilisée pour des travaux devant se faire très lentement.

— On majore la valeur des rapports obtenus par le calcul pour tenir compte de certaines pertes.

— Les travaux agricoles demandant des vitesses d'exécutions très variables, les efforts résistants étant eux aussi très variables, la boîte de vitesses doit comprendre un grand nombre de rapports ; elle est en général constituée par une boîte dont le nombre de rapports est doublé par un réducteur placé à l'entrée, permettant d'avoir une gamme haute et une gamme basse.

— En outre, le tracteur est souvent muni d'une ou deux vitesses synchronisées destinées à la circulation sur route ; une ou deux vitesses sont prévues pour la marche arrière.

Une boîte ainsi conçue est cependant insuffisante ; en effet, en cours de travail il peut y avoir une augmentation brutale de l'effort résistant, telle que le couple déterminé aux roues par la combinaison choisie dans la boîte de vitesses soit insuffisant ; il faut alors s'arrêter, choisir une vitesse inférieure de manière à augmenter le couple disponible aux roues : il y a coupure et le couple résistant au démarrage est toujours supérieur à celui qui existe en travail normal. Le but poursuivi dans l'amélioration des transmissions ces dernières années porte sur ce point précis.

La formule $P_m = \frac{C_m n_r}{716}$ montre que la puissance à l'essieu étant constante, pour augmenter le couple disponible aux roues, il faut diminuer la vitesse de rotation. En travaux agricoles, il faut pouvoir le faire instantanément, sans arrêter l'avancement de l'ensemble tracteur-outil et *sans interrompre la transmission de la puissance du moteur aux roues motrices.*

Un exemple peut illustrer cette nécessité : au cours d'un labour (charrue attelée sur un tracteur muni d'une boîte de vitesses classique à engrenages) si l'agriculteur s'aperçoit qu'il a choisi un rapport de vitesse trop élevé, il est obligé d'arrêter sa machine pour choisir un nouveau rapport d'engrenages ; la charrue étant enterrée, le couple au démarrage peut être de deux à trois fois supérieur à celui exercé en vitesse normale de travail.

La plupart des grandes marques de tracteurs possèdent des dispositifs qui permettent d'éviter cet inconvénient. En effet, pour chaque rapport choisi dans la boîte de vitesses à engrenages, une commande annexe (en général hydraulique) permet de transmettre la puissance vers les roues par une dérivation d'engrenages : ainsi la vitesse décroît instantanément d'environ 20 % et le couple aux roues augmente d'environ 30 % et cela sans coupure dans la transmission et sans se servir de l'embrayage normal.

Ce dispositif est aussi insuffisant : pour manier un chargeur frontal par exemple, et éviter de se servir continuellement de l'embrayage, on peut employer un système inverseur de marche à commande hydraulique. Ce peut être une cloche d'embrayage à deux directions, l'une ayant un disque entraînant une série d'engrenages déterminant une gamme amplificatrice de couple, l'autre ayant un disque permettant d'entraîner un arbre prévu pour plusieurs possibilités de gammes, dont une gamme de marche arrière ; le passage d'un disque à l'autre se fait par une commande hydraulique.

En allant plus loin, on peut avoir des boîtes de vitesses où les différentes combinaisons sont obtenues par des trains d'engrenages simples ou épicycloïdaux, mais dans lesquelles la commande est entièrement hydraulique ; malgré des difficultés d'entretien et surtout de réglage, ce type de boîte est d'une grande souplesse d'utilisation et réduit la fatigue du conducteur.

Le convertisseur de couple est très peu utilisé sur les tracteurs en remplacement de la boîte de vitesses mécanique.

Le terme ultime de l'évolution des transmissions sur les tracteurs est la transmission hydrostatique de puissance. C'est très certainement la voie de l'avenir ; le schéma général en est très simple : le moteur thermique entraîne une pompe qui aspire l'huile dans un réservoir de grande capacité et la met sous forte pression. Cette huile sous pression sert à alimenter un certain nombre de moteurs hydrauliques situés au niveau des roues, de la prise de force, etc.

Un certain nombre de problèmes sont encore à étudier : tenue de l'huile (propriétés physico-chimiques), rendement, tenue des joints. Un des problèmes importants est le prix d'une telle transmission.

Derrière la boîte de vitesses, les tracteurs sont équipés d'un différentiel que l'on peut bloquer pour utiliser l'adhérence de la roue la plus chargée lorsqu'il faut entraîner l'autre ; le dégagement du blocage doit être automatique après utilisation, de manière à éviter tout accident.

3.3.2. Les organes de roulement. — Apparus en France en 1935, généralisés depuis 1945, les pneumatiques ont permis un grand progrès ; les roues métalliques à crampons sont encore utilisées pour certaines cultures spécialisées, comme le riz, par exemple. Les crampons métalliques pénètrent jusqu'à dix ou quinze centimètres dans la masse molle de la rizière pour prendre appui sur le substrat plus dur. Mais la roue métallique n'amortit pas les chocs, roule difficilement sur les sols normaux et les détériore. Les pneumatiques permettent de supprimer ces inconvénients et, grâce à leurs nervures, ont une adhérence presque équivalente à celle des roues métalliques. La diminution de la consommation de carburant varie entre 10 et 35 % ; la vitesse de travail est augmentée de 6 à 35 %.

Les procédés classiques pour améliorer l'adhérence des roues ont déjà été énumérés : emploi de roues jumelées, de roues cages, de semi-chenilles, blocage du différentiel, etc. On peut augmenter les dimensions des pneus. Rappelons que celles-ci sont données en pouces, en centimètres ou même en millimètres : le premier chiffre donne la largeur du boudin sans affaissement et le second, le diamètre de la roue ou diamètre d'accrochage de la jante.

Des pneus de dimensions plus grandes, gonflés à basse pression, ont une surface d'appui plus grande sur le sol : cela augmente les possibilités de traction. Cependant, on est limité par l'encombrement et, de plus, la résistance au roulement est augmentée ; au-dessous de 0,600 bar de pression de gonflage, le pneu tourne sur sa jante et la valve se cisaille.

Le pneu (V. t. 4, La route, chap. 19), rappelons-le, est composé de trois parties ;

— la carcasse formée par la superposition de nappes de tissu ou plis,

— la bande de roulement : en caoutchouc épais muni de barrettes,

— les talons de fixation sur la jante avec des tringles métalliques enrobées dans les plis et la gomme.

Dans les carcasses ordinaires, les plis sont composés de fils de coton, nylon ou rayonne orientés suivant une seule direction : il n'y a pas de trame et les fils sont maintenus par la gomme. Les fils de chaque nappe superposée font entre eux un angle dont la valeur détermine l'écrasement possible du pneu ; en augmentant cet angle, on a récemment accentué l'écrasement du pneu ; l'accroissement possible d'effort de traction dépasse 15 %.

Dans les plis, si l'on ne dispose que des fils radiaux, c'est-à-dire situés dans des plans passant par l'axe de la roue, le glissement diminue ; à effort de traction égal cela entraîne une consommation plus faible et une usure moindre. Cette technique, inspirée de l'industrie automobile (pneus à carcasse radiale), suppose, pour éviter les coupures, un renforcement de la bande de roulement par une ceinture longitudinale.

Les nervures ont un rôle très important sur l'adhérence ; le problème qui se pose est le dégagement de la terre qui risque de rester bloquée entre ces nervures.

3.3.3. La liaison tracteur - outil. — Les tracteurs sont de plus en plus légers par rapport à leur puissance (actuellement moins de 40 kg par cheval-vapeur) ; lorsque l'on a besoin d'efforts de traction importants il faut charger les roues motrices ; cela augmente la résistance au roulement, mais heureusement, sur sol agricole en général mou, cette augmentation est souvent faible (nous avons déjà vu comment on peut augmenter la charge directement sur les roues motrices). Indirectement, la conception de l'attelage et l'intervention du relevage hydraulique permettent aussi d'améliorer l'adhérence.

Quand un tracteur tire un outil, la charge sur l'essieu moteur est modifiée. Les tracteurs sont actuellement équipés d'attelages à l'arrière pouvant se classer en deux grandes catégories :

1° *Attelages en un point* (fig. XXVI-4 a, b, c).

— à axe vertical : chape, crochet, barre oscillante, traverse sur les bras inférieurs, etc. ;

— à axe horizontal : pour les outils tels que les charrues alternatives.

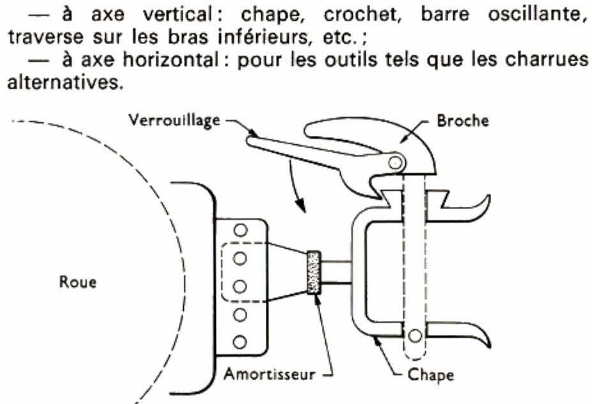
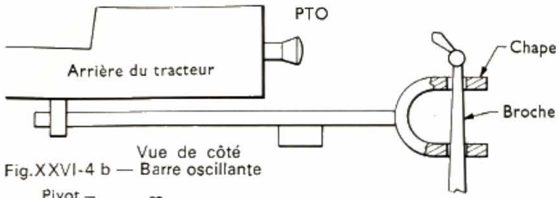
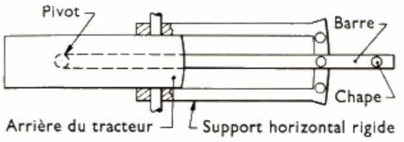


Fig. XXVI-4 a — Vue de côté d'une chape réglable en hauteur



Vue de côté
Fig.XXVI-4 b — Barre oscillante



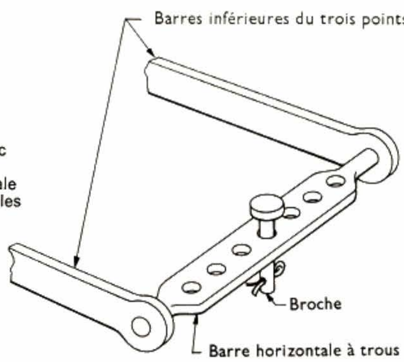


Fig. XXVI-4 c

Barre horizontale à trous multiples

2° *Attelages trois points* (fig. XXVI-5). — Ce dernier type s'est généralisé sur tous les tracteurs. Le principe en est indiqué par la figure XXVI-6.

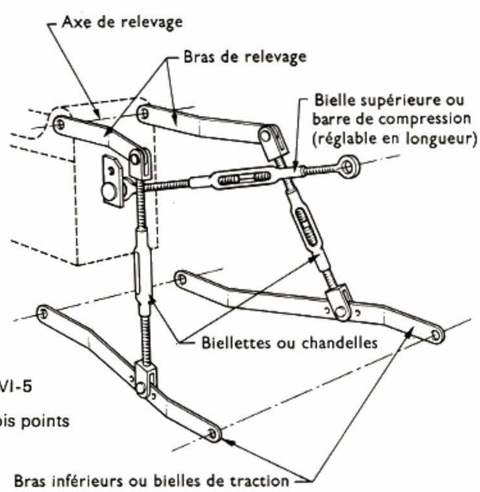


Fig. XXVI-5

Attelage trois points

Les quadrilatères *AA'C'C* et *BB'C'C* sont déformables. *A'* et *B'* sont symétriques par rapport au plan vertical qui contient l'axe du tracteur ; le point *C'* est dans ce plan.

Les barres inférieures sont reliées au relevage hydraulique par des tirants ou chandelles. Cet ensemble permet de lever l'outil durant le transport, de maintenir l'outil en position de travail et de régler la position de l'outil dans tous les plans par rapport au tracteur, cela avec une grande souplesse.

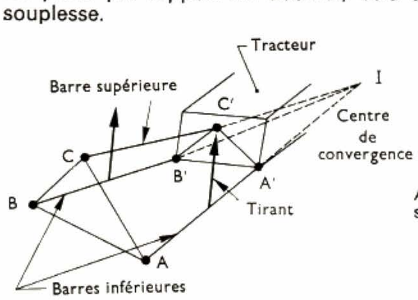


Fig. XXVI-6

Attelage trois points : schéma de principe

Les extrémités du bras d'attelage sont terminées par des rotules dans lesquelles viennent s'engager les chevilles horizontales solidaires d'une triangulation rigide liée à l'instrument. Ces rotules sont normalisées et il existe actuellement trois dimensions correspondant à des catégories de puissances différentes.

L'ensemble des trois bras de l'attelage est construit de manière à converger en un point que l'on appelle *centre de traction* ou *point de convergence ;* la position de ce point par rapport à l'essieu moteur a une grande influence sur la stabilité du tracteur, et, par conséquent, sur ses possibilités de traction.

Que l'attelage soit en un point ou en trois points, s'il est bien conçu, la traction provoque une amélioration de l'adhérence.

Dans le cas de traction d'une remorque à quatre roues, c'est-à-dire quand l'effort de traction est horizontal, l'accroissement de l'effort a une action sur l'équilibre et sur l'adhérence du tracteur. Cette action dépend de la hauteur du crochet d'attelage par rapport à l'essieu arrière. S'ils sont à la même hauteur, cette action est nulle. Si le crochet est au-dessus de l'essieu, l'accroissement de l'effort provoque une tendance au pivotement du tracteur autour de l'essieu arrière. Il y a transfert de poids de l'avant du tracteur vers l'arrière ; pour une longueur d'attelage déterminée, le phénomène est accentué en élevant le point d'attelage. On limite cette action pour des raisons de sécurité évidentes : direction trop légère donc impossible à contrôler et à la limite cabrage ; dans ce cas, la seule parade consiste à débrayer. On peut aussi charger l'avant du tracteur avec des masses.

Dans le cas d'une charrue au travail, le problème est beaucoup plus complexe que précédemment. L'action de la charrue sur le tracteur peut approximativement se ramener à trois ensembles de forces :

— la résultante des résistances rencontrées par les pièces travaillantes dans le sol,

— le poids de la charrue,

— la résultante des réactions du sol sur les supports de l'outil.

La résultante générale est assimilable à une force unique, inclinée sur l'horizontale. C'est l'inclinaison et l'intensité de cette force qui déterminent les réactions de l'outil sur le tracteur ; on peut intervenir par réglage de l'attelage.

Si l'outil est complètement porté au travail, tout son poids est appliqué sur l'essieu arrière, mais les possibilités de transfert de poids de l'avant du tracteur sur l'arrière sont limitées. On ne risque pas le cabrage.

Si l'outil est semi-porté au travail, ce qui est le cas le plus fréquent, une partie de son poids seulement se reporte sur l'essieu arrière ; il y a transfert de charge de l'avant vers l'arrière, avec à la limite, risque de cabrage du tracteur.

Si l'outil est traîné, et possède ses propres supports, l'action de l'outil sur l'adhérence est nécessairement limitée ; cependant au fur et à mesure que l'effort résistant augmente, l'outil prend de plus en plus appui sur ses supports et il finit par soulever le tracteur qui patine.

Avec les outils portés et semi-portés et les attelages en trois points, les conditions d'adhérence sont fortement modifiée par la conception et le réglage de l'attelage. En particulier la position du centre de convergence par où passe la direction de la résultante des forces est très importante.

Si la convergence est courte, c'est-à-dire si le centre de traction est près du pont arrière moteur, la charrue suit bien les inégalités du sol, le report de poids sur l'essieu arrière est important, mais la stabilité de l'outil est mauvaise et il faut souvent modifier les réglages ; en virage, la charrue suit bien le tracteur et revient d'elle-même en ligne. En contre-pente en revanche, si le tracteur a tendance à riper, la charrue glisse en même temps.

Si la convergence est longue, c'est-à-dire si le centre de traction est très en avant du pont, la stabilité en travail est grande, mais le report de poids de l'outil sur l'essieu arrière est faible ; il n'y a pas de risque de cabrage. En virage la charrue est très déportée. En contre-pente, la charrue maintient le tracteur en ligne et l'empêche de riper.

L'attelage trois points a considérablement accru la maniabilité de l'outil par rapport au tracteur. Cependant il

présente un inconvénient : il est plus difficile à mettre en place qu'un attelage en un point. Des systèmes permettent d'atteler rapidement les trois points, mais ils ne se sont pas aussi vite répandus que l'on aurait pu le croire.

3.3.4. Les relevages hydrauliques. — Ils équipent actuellement tous les tracteurs. Une pompe entraînée par le moteur thermique du tracteur met l'huile sous pression ; un distributeur commandé par une manette permet d'envoyer l'huile dans un vérin lui-même relié par un système bielle-manivelle à un axe portant deux bras de relevage. En général, ceux-ci sont reliés par des tirants ou chandelles aux barres inférieures de l'attelage trois points.

Un outil (charrue) attelé sur le trois points (fig. XXVI-7 a et b) exerce des efforts différents selon les conditions de fonctionnement :

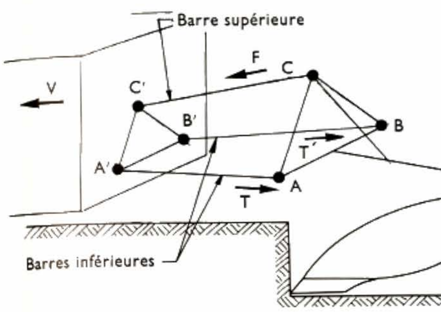
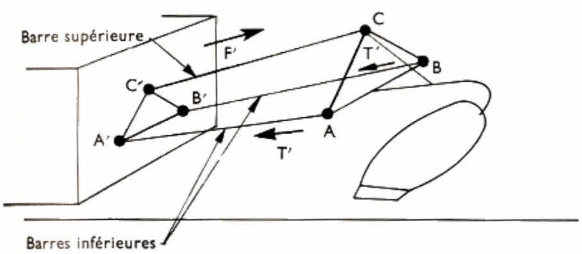


Fig. XXVI-7
Outil attelé à un attelage trois points

a) Ensemble tracteur-charrue au travail



b) Ensemble tracteur-charrue pendant le transport

— S'il est en travail, l'outil a tendance à pivoter autour de l'axe inférieur d'attelage lorsque l'effort augmente, donc à tirer sur les barres inférieures et à pousser sur la barre supérieure ; si l'effort diminue, la poussée sur la barre supérieure diminue et la traction sur les barres inférieures augmente.

— S'il est au transport, il y a poussée sur les barres inférieures et traction sur la barre supérieure.

Ces propriétés vont être utilisées pour les asservissements des relevages hydrauliques. En effet, le relevage hydraulique fait partie intégrante du tracteur actuel. Il contribue non seulement à faciliter la maniabilité mais aussi, dans certains cas, à mieux utiliser l'adhérence et à permettre au tracteur de travailler toujours dans les conditions optimales. Les asservissements peuvent prendre différentes formes :

— asservissement géométrique, ou contrôle de position,

— asservissement dynamique, ou contrôle d'effort.

a) Un relevage hydraulique est *asservi en position* lorsqu'à toute position de la manette de commande sur son secteur de repérage correspond une position et une seule de l'outil par rapport au tracteur. Il n'est plus besoin de regarder en arrière pour retrouver la bonne position de l'outil. Tous les relevages des tracteurs modernes sont asservis en position.

b) *L'asservissement dynamique* est plus compliqué dans le détail, mais son principe est simple. Le contrôle d'effort équipe maintenant presque tous les tracteurs.

● *Principe du contrôle d'effort.* — Le contrôle de l'effort se fait par les bras inférieurs ou par le bras supérieur de l'attelage trois points. Il s'agit d'un fonctionnement « en automation » qu'un exemple concret va nous faire mieux comprendre.

Prenons un système sensible aux variations de compression sur la barre supérieure d'attelage. Le conducteur choisit une position de la manette de terrage. L'effort moyen de fonctionnement automatique est alors préréglé. L'outil pénètre dans le sol à cause de son poids et de son entrure. Le distributeur laisse l'huile s'échapper du vérin. L'effort résistant que rencontre l'outil va en augmentant, de même que l'effort de compression sur la barre supérieure d'attelage (l'outil a tendance à pivoter autour des rotules inférieures). Quand l'outil atteint une certaine profondeur, correspondant à un certain effort dans un sol déterminé, le distributeur est commandé pour maintenir l'huile emprisonnée dans le vérin. L'outil est alors complètement porté par le tracteur. Si la résistance du sol change, à cause d'ondulations locales du terrain faisant, par exemple, pénétrer la charrue plus profondément, il en résulte une variation de compression sur le bras supérieur d'attelage et celle-ci est transmise au tiroir du distributeur par l'intermédiaire d'un ressort et d'un jeu complexe de leviers et de cames, de façon à envoyer l'huile sous pression dans le vérin pour soulever l'outil ; le mouvement s'arrête lorsqu'on retrouve la valeur de l'effort initial. Ainsi, en terrain homogène, quel que soit le relief, la profondeur de travail reste constante et la liaison entre le tracteur et l'outil reste optimale du point de vue de l'adhérence.

En terrain hétérogène, même plat, cette automaticité provoque de légères variations de la profondeur de travail.

Sur les systèmes les plus perfectionnés, la *sensibilité* est réglable (selon le poids de l'outil) ainsi que la *vitesse de réaction* du relevage (selon la nature du sol).

Le contrôle automatique par les bras inférieurs d'attelage semble être préféré car il est plus direct et mieux adapté aux outils modernes longs et lourds.

Notons qu'il existe des systèmes mixtes dans lesquels les effets du contrôle d'effort sont limités par le contrôle de position et inversement.

● *Principe du transfert de charge.* — Certains tracteurs sont aussi équipés de systèmes non automatiques de transfert de charge. Cette réalisation est nettement en régression par rapport aux systèmes automatiques.

En cas de patinage momentané avec un outil semi-porté, l'action sur une manette, distincte de la manette générale de contrôle de position, permet d'envoyer de l'huile sous pression réduite dans le vérin. Cette pression est insuffisante pour soulever l'outil mais diminue l'appui de l'outil sur le sol et, par réaction, l'outil appuie davantage sur le tracteur, en même temps que s'accentue le report de charge de l'avant vers l'arrière du tracteur. L'adhérence peut être ainsi momentanément accrue.

● *Principe de la modulation de traction.* — C'est un transfert de charge que l'on obtient avec des outils entièrement traînés, par exemple une remorque à quatre roues. Un dispositif hydraulique annexe permet d'envoyer l'huile sous une pression réduite — que l'on choisit à l'aide d'une manette auxiliaire — et un système mécanique d'attelage transfère cette action sur l'essieu arrière du tracteur. Pour éviter les risques de cabrage, un dispositif automatique de sécurité est incorporé au système complémentaire d'attelage.

4. LES DIFFÉRENTS TYPES D'ENGINS DE TRACTION

Les types d'engins de traction équipant le monde agricole sont nombreux et variés.

4.1. Le tracteur « row - crop ». — Il est caractérisé par un haut dégagement sous le châssis, des roues étroites et de grand diamètre avec voie variable à l'arrière, un freinage indépendant sur chaque roue, une ou deux roues jumelées à l'avant. Ces tracteurs peuvent se déplacer aisément dans les cultures en lignes même si le développement végétatif est avancé ; leur manœuvre est aisée. Ils sont très bien adaptés aux opérations de binage, sarclage, poudrage, pulvérisation, etc. Ils le sont moins pour les travaux lourds, de travail du sol, par exemple.

Il y a quelques années, ils constituaient la majorité du parc américain de tracteurs. Ils sont très nettement en régression actuellement.

4.2. Le tracteur standard. — C'est le tracteur actuellement le plus répandu. Il est conçu comme une centrale mobile d'énergie; il doit pouvoir effectuer tous les travaux agricoles, depuis les travaux lourds tels les labours, jusqu'aux travaux légers tels les traitements phytosanitaires, en passant par les transports et les travaux de récoltes.

Il correspond au type de tracteur décrit dans les paragraphes précédents : moteur Diesel (très peu avec moteur à essence) et injection mécanique par pompe à piston ou rotative. Un régulateur permet au conducteur de choisir un régime déterminé : l'appareil réagit ensuite automatiquement, dans une certaine plage d'action, l'alimentation du moteur et donc sa puissance étant augmentée ou diminuée en fonction des variations de l'effort résistant subies par l'outil, de manière à maintenir à peu près constant le régime du moteur. Cela est obligatoire sur un tracteur agricole, car le conducteur qui a beaucoup de choses à faire par ailleurs (direction, surveillance de l'outil, etc.) ne peut continuellement changer l'alimentation du moteur en fonction des variations de la charge : le régulateur le fait pour lui.

L'embrayage est souvent à double effet de manière à avoir une semi-indépendance à la prise de force; celle-ci est quelquefois totalement indépendante avec une ou deux vitesses normalisées et la possibilité d'avoir une vitesse proportionnelle à l'avancement.

Les transmissions sont en général classiques, avec boîtes à engrenages ; une boîte permet d'obtenir trois à six vitesses en marche avant; un réducteur à l'entrée sert à doubler cette gamme. Les vitesses route sont synchronisées; il y a en général une ou deux vitesses pour la marche arrière. Un grand nombre de tracteurs possèdent des amplificateurs instantanés de couple; les commandes font de plus en plus appel à l'hydraulique. Les transmissions entièrement hydrostatiques sont encore rares sur le marché, mais quelques modèles sont commercialisés. Tous les tracteurs ont un différentiel avec blocage à dégagement automatique.

Les tracteurs standards sont équipés d'attelages en un point, et d'attelages trois points reliés au relevage hydraulique. Ces derniers sont tous asservis; le tracteur moderne possède le contrôle de position, le contrôle d'effort, quelquefois l'utilisation mixte; notons d'ailleurs que la centrale hydraulique du tracteur devient de plus en plus complexe et importante : non seulement elle doit assurer le fonctionnement du relevage asservi mais encore elle permet d'alimenter des vérins extérieurs aux tracteurs ou même des petits moteurs hydrauliques sur des machines.

Le poste de pilotage est conçu de manière à assurer le confort et la sécurité du conducteur.

La viticulture utilise des tracteurs « étroits » directement dérivés du tracteur standard par réduction surtout de la largeur.

Le microtracteur est un modèle réduit du tracteur standard. Il est en général équipé d'un moteur à essence à quatre temps.

4.3. Le tracteur à quatre roues motrices. — Ce type de tracteur connaît un renouveau de succès. En effet, avec l'augmentation des puissances du moteur, les tracteurs sont de plus en plus lourds, mais le poids par unité de puissance est de plus en plus faible ; les quatre roues motrices permettent d'utiliser efficacement tout le poids pour améliorer l'adhérence. Notons qu'un vrai tracteur à quatre roues motrices doit avoir des roues de même diamètre sur l'essieu avant et arrière, avec une répartition du poids identique ; cependant le rayon de braquage est alors faible et la maniabilité est mauvaise. En agriculture, souvent le train avant moteur est constitué par des roues de diamètre inférieur à celles du train arrière, et ne supportant pas la même charge ; la direction est classique avec une assistance hydraulique.

De petits tracteurs à quatre roues motrices, destinés à la viticulture ou à l'arboriculture, comportent quatre roues ayant la même fonction mais dont la direction se fait par cassure du bâti au centre en utilisant une commande hydraulique.

4.4. Le tracteur navette. — Très souvent combiné avec le tracteur à quatre roues motrices, il fonctionne dans les deux sens grâce à un inverseur de marche. Il est très peu utilisé en agriculture.

4.5. Le tracteur à chenilles. — Si durant certaines périodes le chiffre des ventes de ces tracteurs à chenilles a augmenté, il ne semble pas que pendant les vingt dernières années le pourcentage des ventes en France et dans la plupart des pays d'Europe, ait progressé, exception faite peut-être en Italie.

4.5.1. Principe. — Comme pour un tracteur à roues classique, la puissance du tracteur à chenilles est fournie par un moteur, dans la plupart des cas Diesel, et transmise par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses à un embout d'arbre. C'est à ce niveau que le tracteur à chenilles se différencie du tracteur à roues : au lieu de jantes porteuses équipées de pneumatiques agraires il comporte des trains de roulements (fig. XXVI-8) constitués par une chaîne sans fin de patins articulés entre eux et suffisamment larges pour augmenter la surface portante. L'articulation entre patins est constituée par un axe qui sert à l'engrenage de la

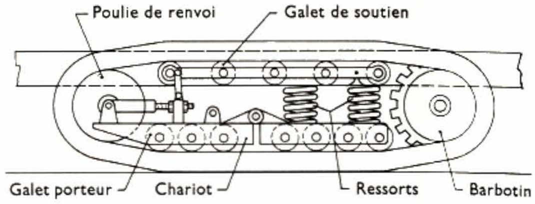


Fig. XXVI-8 — Train de chenilles ou chaînes de roulements

poulie motrice, appelée barbotin, portée par l'essieu moteur. À l'autre extrémité, une poulie de renvoi permet à la chaîne de patins de revenir.

Sur leurs faces inférieures les patins sont munis de nervures qui s'accrochent au sol; sur leurs faces supérieures se trouvent deux nervures de guidage, constituant les rails de roulement sur lesquels le véhicule repose par l'intermédiaire de galets réunis par groupes de deux ou quatre, chaque groupe formant un chariot support du véhicule (fig. XXVI-9). La poulie de renvoi est libre et réglable en position ce qui permet de modifier la tension des chenilles. Les chariots sont reliés au châssis par des organes de suspension leur permettant de suivre sans dérailler les déformations de la chenille : des galets de soutien supportent la chenille à la partie supérieure.

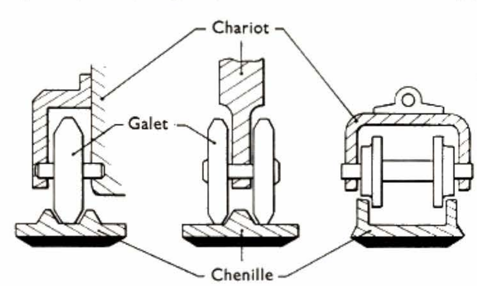


Fig. XXVI-9
Guidage des chenilles

Le changement de direction d'un tel système ne peut se faire qu'en imprimant des vitesses différentes aux deux chenilles porteuses, l'une d'elles pouvant être bloquée pour virer sur place.

4.5.2. Avantages. — Sur tout engin de traction on cherche à avoir le maximum de puissance au crochet.

Or, cela dépend essentiellement de quatre facteurs :

— la puissance fournie par le moteur,
— la surface de contact avec le sol,
— le poids appliqué sur cette surface,
— la nature et l'état du sol.

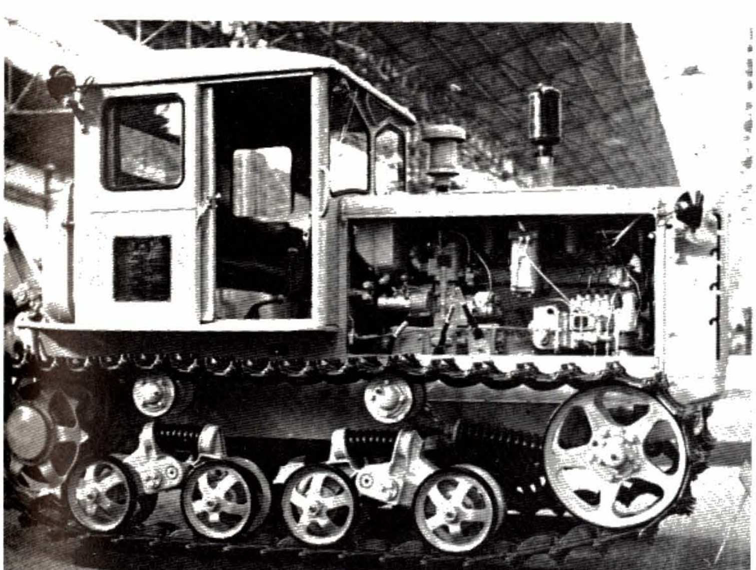
L'utilisation des chaînes porteuses de roulement permet essentiellement d'augmenter la surface de contact avec le sol ; par voie de conséquence, à charges totales égales le tassement est plus faible (d'où respect de la structure du sol) et l'adhérence est meilleure : les chenilles dérapent moins. Des essais montrent que plus le terrain est humide, plus l'avantage des chenilles par rapport aux systèmes à deux ou quatre roues motrices est manifeste.



Tracteur Renault à moteur Diesel 3 cylindres; voies variables (AV: 1,20 m à 1,90 m; AR: 1,20 m à 1,80 m); masse sans lestage: 1 700 kg; avec lestage: 2 300 kg (*E.N.S.A. de Grignon*)



Tracteur de 175 ch à 4 roues motrices et directrices (*A. Dubuisson — E.N.S.A. de Grignon*)



Tracteur à chenilles avec cabine (*E.N.S.A. de Grignon*)

En outre la résistance au roulement, c'est-à-dire la force qu'il faut vaincre pour que l'engin avance, est voisine de 1 à 2 pour cent sur un engin à chenilles alors qu'elle peut atteindre 9 pour cent pour un engin à roues, cela sur des terrains identiques. Cette résistance au roulement intervient bien entendu dans le tassement du sol ; en condition de sol identique il est certain que le tracteur à chenilles, qui exerce une pression au sol plus faible (0,45 bar) que le tracteur à roues (1,3 bar) et qui a une résistance au roulement du système interne pratiquement négligeable, tasse moins. Ce fait peut d'ailleurs pousser à utiliser le tracteur à chenilles dans des conditions néfastes, par exemple, dans le cas d'un sol détrempé, où le tracteur à roues ne serait pas utilisable ; cependant, malgré sa faible pression, le tracteur à chenilles risque de provoquer des tassements dus à la fluidité du sol, et des incidents de structure préjudiciables à la culture.

4.5.3. Stabilité. — Le tracteur à chenilles est plus stable transversalement.

Au point de vue économique, à puissance de traction égale (et non puissance du moteur) le tracteur à chenilles est moins cher que le tracteur à roues. D'une part, si un train de pneus coûte deux fois moins cher qu'un jeu de chenilles, il dure trois fois moins longtemps (sauf cas de rupture) ; le coût horaire est donc beaucoup moins élevé pour les chenilles. D'autre part, un train de chenilles usé peut être rénové pour un prix sensiblement égal à celui d'un train de pneus neufs (5 000 heures de tenue)

4.5.4. Évolution de la vente des tracteurs à chenilles. — Le chiffre des ventes est resté toujours très faible ; par rapport au total des ventes sur le marché français le pourcentage est toujours resté inférieur à deux pour cent (2 %).

Les départements qui s'équipent le plus en tracteurs à chenilles sont les départements à vocation viticole ou fruitière, à terrains friables mais à climat sec en période de travaux. Cela confirme que le tracteur à chenilles considéré comme engin agricole, n'est pas utilisé en terrain humide, là où un tracteur à roues ne passerait pas. Son utilisation en climat sec, sur sol friable, dans des cultures demandant un grand nombre de passages d'outils est confirmée par le marché italien : 30 % (trente pour cent) des ventes sont des tracteurs à chenilles, en particulier sur les sols crayeux du Sud, pays de vignobles et d'arbres fruitiers.

Remarquons que parallèlement aux autres tracteurs, l'évolution s'est faite aussi vers les grandes puissances : de 25 ch en 1959 à 40 ch actuellement.

4.6. Les tracteurs enjambeurs vignerons. — Dans toute culture traditionnelle que l'on désire moderniser, ou plus exactement adapter aux contingences économiques de l'heure, le problème essentiel est de réduire le temps de travail nécessaire pour une production déterminée. Un des facteurs de cette transformation est la mécanisation partielle ou totale de la culture considérée. Encore faut-il que l'augmentation de capital investi (achat du matériel dont le coût est à répartir sur plusieurs années) et le coût annuel dû au fonctionnement et à l'entretien ne dépassent pas l'augmentation espérée de bénéfice sur la culture. Un problème technique peut alors se poser parmi tant d'autres : faut-il adapter la culture au matériel standard existant ou choisir un matériel spécialisé adapté à la culture telle qu'elle est ? Lorsqu'elle est possible, la première solution est, à longue échéance, la moins chère. L'investissement de capitaux dû à la transformation de la culture est fait une fois pour toutes ; le prix du matériel standard est évidemment moins élevé que celui d'un matériel spécialisé. Cependant, il est non moins évident que cette solution n'est pas toujours possible. C'est le cas bien souvent dans la viticulture pour les plantations à faible écartement de vignes en gobelets ou palissées. Les tracteurs enjambeurs sont alors particulièrement adaptés.

Les tracteurs enjambeurs peuvent appartenir à deux grands groupes :

— Les tracteurs standards qui sont montés sur des portiques enjambeurs.

— Les tracteurs conçus au départ pour être des enjambeurs viticoles ; parmi ceux-ci il faut distinguer : les tracteurs étroits stabilisés et les tracteurs viticoles enjambeurs.

4.6.1. Les tracteurs de construction classique montés sur châssis-pont enjambeurs. — Ces tracteurs enjambent un ou deux rangs de vigne. Les châssis-pont sont constitués par un assemblage de fortes tôles, tubes ou poutrelles sur lequel est posé et maintenu le corps du tracteur standard ; leurs dimensions sont variables et faites à la demande de l'utilisateur pour le tracteur qui doit être mis dessus, en fonction de sa puissance et de l'écartement du vignoble ; en général les quatre roues de l'enjambeur sont celles du tracteur standard, l'entraînement des roues motrices étant fait par chaînes sous carter étanche à partir des deux demi-arbres du pont arrière. Ces roues motrices sont de part et d'autre de la rangée enjambée. Ces tracteurs peuvent être équipés de deux charrues vigneronnes relevables à la verticale soit directement par le relevage hydraulique du tracteur, soit par l'intermédiaire de deux vérins annexes (ce qui augmente le prix de l'adaptation). Avec ce type de tracteur on peut donc travailler deux rangées de vigne. C'est là leur gros intérêt ; de plus, en quelques heures de travail on peut démonter l'ensemble et récupérer ainsi le tracteur standard agricole.

Alliant la puissance au rendement, ces tracteurs sont cependant assez chers. Ils ne sont donc adaptés qu'aux exploitations viticoles de superficie importante ou à revenu brut à l'hectare élevé ; très répandus dans le Midi, leur stabilité dans les contre-pentes est nettement supérieure à celle des tracteurs interlignes à roues.

4.6.2. Les tracteurs à châssis-pont enjambeurs conçus dès le départ pour être des tracteurs viticoles. — Comme les précédents, ces tracteurs possèdent deux roues motrices arrière ; ils enjambent un ou deux rangs de vigne. Le moteur est soit à l'avant, soit à l'arrière. Ils sont soit à essence, soit Diesel. Les bâtis enjambeurs sont légers, en poutrelles ou tubes.

Les tracteurs de faible puissance fonctionnent en général avec des moteurs essence. Ce sont plutôt des pulvérisateurs automoteurs à grande capacité de travail ; 20 à 25 hectares par jour. Ils peuvent aussi tirer des outils de culture. On ne laboure, par exemple, que le rang chevauché ou un seul interligne.

Lorsque le poste de conduite est à l'avant, la visibilité est bien meilleure et le conducteur peut surveiller parfaitement ses outils. En revanche, le moteur à l'arrière, sur les roues motrices, favorise l'adhérence.

Ces tracteurs possèdent un système de réglage et de contrôle de profondeurs des outils.

Un modèle de tracteur de ce type, plus large et plus haut qu'un tracteur ordinaire, est équipé de deux roues avant directrices déportées sur le côté gauche. Ainsi il est très maniable. Notons aussi que certains tracteurs sont prévus avec moteur sur le côté, la place du conducteur étant de l'autre côté de l'engin. L'adhérence semble meilleure et la stabilité dans les contre-pentes aussi ; cela résulte du fait que le centre de gravité de l'ensemble est plus bas pour un polygone de sustentation aussi grand. Les puissances sont comprises entre 20 et 38 ch (moteurs essence ou Diesel).

Tous les tracteurs de ce type possèdent en général un blocage de différentiel et une prise de force. Les voies varient de 1,05 m à 2,5 m ; certains de ces châssis sont même légèrement extensibles (de quelques centimètres). Moins cher que l'ensemble tracteur standard avec châssis-pont enjambeur, il travaille moins vite pour les façons culturales, aussi vite en pulvérisation.

4.6.3. Les tracteurs étroits stabilisés. — Dans cette troisième catégorie, nous distinguerons les tracteurs travaillant :

— soit un interligne,
— soit deux interlignes.

Les premiers sont des tracteurs enjambeurs rétrécis au maximum et possédant à l'avant et à l'arrière une ou deux roues jumelées ; très étroits, ils sont maintenus droits par un ou deux bras stabilisateurs qui enjambent le ou les rangs de vigne latéraux. Les roues principales avant et arrière peuvent être motrices et directrices ou bien seule la roue





Tracteur enjambeur Loiseau à stabilisation hydraulique et 2 roues motrices directrices, la roue arrière étant blocable (*Institut technique du vin*)



Tracteur enjambeur vigneron Lescure, sur portique (*E.N.S.A. de Grignon*)

arrière est motrice et les stabilisateurs sont montés sur roue libre.

Ces tracteurs conviennent particulièrement au travail en fort dévers ; les bras stabilisateurs sont en effet réglables en hauteur et largeur à la main ou par vérins hydrauliques. Très maniables, légers, simples de construction, quelquefois difficiles à entretenir et à réparer (car très compacts), ils sont surtout intéressants dans les exploitations familiales de vignobles de crus.

Les tracteurs pouvant travailler deux interlignes sont parfois équipés de deux roues motrices jumelles à l'avant et à l'arrière, sur le corps principal, et deux roues motrices sur le stabilisateur. Pour d'autres, les deux roues du même interligne sont directrices et seule la roue arrière est motrice. La roue du stabilisateur est facultativement motrice et de même dimension que la roue motrice principale. Ces tracteurs sont plus simples que les précédents et surtout les organes sont plus accessibles. Ce sont des appareils extensibles en largeur jusqu'à 2 m par commande hydraulique. Cette catégorie se classe en réalité entre celle des tracteurs étroits stabilisés et celle des châssis-ponts enjambeurs ; ils ont un rendement au travail en labour très élevé du fait de leur puissance, mais sont compliqués du point



Tracteur étroit dérivé d'un tracteur standard et adapté à la viticulture (*E.N.S.A. de Grignon*)



Motoculteur équipé d'une charrue ; l'attelage non déporté oblige l'agriculteur à marcher dans le sillon (*Photo-Industrie — E.N.S.A. de Grignon*)

de vue mécanique. Très chers, ils sont destinés aux exploitations importantes.

4.7. Les motoculteurs. — Un certain nombre de petits appareils, conçus au départ pour être utilisés par les maraîchers ou les très petites exploitations et ayant une structure très proche, sont quelquefois confondus.

Le motoculteur est, comme le tracteur, une centrale mobile d'énergie ; à la différence du tracteur il n'a qu'un seul essieu à une ou deux roues. On l'appelle souvent tracteur mono-axe. Il est donc fait pour tirer, porter, pousser, actionner un certain nombre d'outils ; suivant son équipement il pourra s'appeler :

— motofraise,
— motobineuse,
— motofaucheuse,
— mototreuil.

Un cas particulier est celui de la moto-houe ; c'est une houe rotative actionnée par un moteur ; il n'y a pas de roue motrice, la réaction du sol sur l'outil en rotation assurant l'avancement.

En fait, il existe des systèmes où l'ensemble du bloc moteur peut être monté indifféremment sur :

— un essieu moteur : motoculteur,
— une houe : moto-houe,
— une faucheuse : motofaucheuse,
— un treuil : mototreuil, etc.

Utilisés initialement dans les petites exploitations et les installations maraîchères, le motoculteur et ses dérivés ont rapidement intéressé les amateurs de jardinage, les entreprises de voirie, les sociétés d'entretien de parcs et de jardins.

L'un des tableaux suivants donne le nombre de motoculteurs vendus sur le marché français, ces dernières années.

Remarque importante à faire à la vue de ces chiffres : en 1967, 48 % des matériels vendus en France sont des motoculteurs importés, alors que ce pourcentage n'était que de 20 % en 1963. Les matériels issus de la grande industrie étrangère, japonaise en particulier, en sont la cause ; certes, la France exporte des motoculteurs mais en petite quantité.

Vente des motoculteurs en France

Année	Matériel français	Importations	Totaux
1963	32 367	9 424	41 791
1964	38 565	15 017	53 582
1965	45 610	13 822	59 432
1966	58 928	27 403	86 331
1967	53 194	48 483	101 577
1968	62 800	82 562	145 362
1971	46 392	44 208	90 600
1973	50 700	41 313	92 013

Comment est constitué un motoculteur ? Nous distinguerons le moteur, le châssis et les transmissions. Le châssis englobe le bâti, l'essieu moteur, les roues, les freins, les mancherons de guidage. Il supporte le moteur et porte en outre un système d'attelage pour les différents outils.

4.7.1. Le moteur. — Soixante-dix-huit pour cent des modèles *proposés* sont équipés de moteurs à essence à allumage commandé et vingt deux pour cent seulement de moteurs Diesel. Une autre remarque intéressante est de savoir que 26 % sont des moteurs à deux temps à essence et 9 % sont des moteurs Diesel à deux temps. Tout le reste, dans chaque catégorie, est à quatre temps. Une marque a essayé de monter le moteur à piston rotatif au lieu du moteur à pistons en ligne animés d'un mouvement alternatif (type classique) ; cela paraît une solution chère pour l'instant.

Il est aussi intéressant de voir que la puissance des moteurs de motoculteurs dépasse rarement 12 ch ; l'étagement des puissances peut se représenter ainsi :

Puissance (1 ch = 735 W)	Pourcentage	Répartition du pourcentage	
		Essence	Diesel
0 à 5 ch ...	32 %	32	0
5 à 8 ch ...	46 %	37	9
8 à 12 ch ..	22 %	9	3

La plupart des moteurs de motoculteurs sont refroidis par air ; le volant, muni d'ailettes, sert de turbine dans la plupart des cas ; quelquefois, il y a un ventilateur indépendant.

L'allumage est du type à bougies pour les moteurs à essence, avec un volant magnétique ou une magnéto.

La régulation du moteur est en général assurée par un système centrifuge. La mise en route se fait à l'aide d'un lanceur qui entraîne le volant et peut être actionné par une corde ou une manivelle ; la plupart des lanceurs sont à retour automatique. Quelques motoculteurs sont équipés d'un système d'allumage classique et sont mis en route au moyen d'un démarreur.

En ce qui concerne le graissage, les moteurs à essence sont graissés par barbotage ; les moteurs Diesel sont obligatoirement graissés sous pression : une pompe prélève l'huile au fond du carter et l'envoie sous pression dans des canalisations qui débouchent aux principaux niveaux à graisser (vilebrequins, paliers, etc.).

Les carburateurs sont prévus pour fonctionner dans toutes les inclinaisons.

4.7.2. Le châssis. — Le bloc moteur et le carter des transmissions, rigidement liés, tiennent lieu de bâti. L'essieu moteur est lié au carter des transmissions de manière à ménager la garde au sol. Les trompettes de protection des deux demi-arbres sont extrêmement réduites et viennent souvent de fonderie, rapportées ou non.

Évolution du parc des motoculteurs en France

1945	1948	1958	1964	1966	1967	1968	1969	1971	1972
5 100	20 800	135 000	340 000	450 000	530 000	640 000	750 000	920 000	973 000

En ce qui concerne les pneumatiques, le problème est analogue à celui posé par le tracteur, à une échelle moindre bien entendu. Dimensions relatives, formes des sculptures, revêtement métallique, etc., déterminent l'adhérence de l'outil. En particulier il est possible d'adjoindre des masses sur le bâti ou de remplir d'eau partiellement les pneumatiques.

La voie du motoculteur (distance séparant les deux centres des roues) est en général réglable par coulissement des moyeux sur les deux demi-arbres.

Le freinage est obtenu au moyen d'un système de freins à tambours ou, parfois, à disques. Un frein à sangle est monté sur la cloche d'embrayage, l'arbre de transmission ou le différentiel par quelques constructeurs.

Le guidage se fait par l'intermédiaire d'un guidon sur lequel sont rapportées toutes les commandes, y compris le levier de vitesse qui est placé près des mancherons utilisés pour « tenir » l'appareil. Le guidon est souvent réglable en position dans le plan horizontal ce qui permet de le déporter et facilite ainsi le travail de l'agriculteur (cela évite de marcher derrière le motoculteur).

Le guidon peut pivoter quelquefois de 180° : ainsi on peut inverser facilement le sens de marche. Une commande particulière permet le clabotage ou le déclabotage séparé des roues.

4.7.3. Les transmissions. — La plupart des embrayages montés sur les motoculteurs sont coniques ou monodisques à sec ; il y a très peu d'embrayages multidisques. Quelquefois on utilise les embrayages centrifuges automatiques : la commande manuelle est alors supprimée et cela évite un certain nombre de fausses manœuvres.

Les boîtes de vitesses sont en général pour trois vitesses en marche avant (entre 0,6 km/h et 20 km/h) et une marche arrière ; on trouve aussi des boîtes à quatre ou six rapports avant et deux rapports arrière ; il existe des boîtes « symétriques » à six rapports avant et six rapports arrière par simple inversion. Les vitesses rapides sont réservées à la circulation sur route, ce qui suppose des accessoires (arrière-train) et un bon système de freinage.

Comme sur beaucoup de tracteurs, les motoculteurs peuvent être équipés, à l'entrée de la boîte de vitesses, d'un réducteur qui double la gamme. Exemple d'équipement :

Inverseur + Réducteur + Boîte à trois vitesses

Cela donne six vitesses dans chaque sens.

Quelques motoculteurs sont équipés de variateurs à courroies trapézoïdales.

La plupart des motoculteurs sont munis d'un différentiel et d'un réducteur final ; sur chaque demi-arbre un système de crabot permet de bloquer une roue et de manœuvrer facilement en fourrière. Le différentiel est muni d'un système de blocage commandé pour mieux utiliser l'adhérence en certains passages : on utilise l'adhérence de la roue qui est sur le sol ferme pour entraîner celle qui glisse.

De plus, les motoculteurs sont munis de prises de force à l'arrière ; quelques-uns en ont à l'avant ou sur le côté. Il n'existe aucune normalisation en ce qui concerne les prises de force des motoculteurs ; on en trouve de tous les diamètres et leurs vitesses de rotation sont en général proportionnelles à l'avancement avec, très souvent, des rapports différents suivant les marques.

5. LES ESSAIS DE TRACTEURS

Pour disposer de renseignements techniques indiscutables, établis dans les mêmes conditions pour les différents matériels, depuis 1960 il existe un code commun à tous les pays membres de l'O.C.D.É.

5.1. Essais obligatoires

5.1.1. Mesure de la puissance moteur. — Dans le code O.C.D.É. cette mesure se fait sur la prise de force principale qui doit tourner à 540 tours par minute pour le régime nominal du moteur. En fait, on effectue des essais à puissance maximale, des essais à vitesse variable et à charge maximale, des essais à la vitesse normalisée de la prise de force et des essais à charge partielle.

Ces essais sont réalisés sur un banc fixe qui permet de freiner progressivement l'arbre de la prise de force ; pour chaque équilibre on mesure la valeur du couple, le régime du moteur et la consommation dans un intervalle de temps choisi. Les résultats permettent l'établissement de graphiques donnant en fonction du régime moteur :

— les variations du couple moteur,

— les variations de la puissance,

— la consommation spécifique, c'est-à-dire la masse de carburant consommée rapportée à l'unité de puissance et à l'unité de temps.

Aux États-Unis d'Amérique on utilise la norme SAE.

La puissance est mesurée directement au moteur, sans aucun accessoire, ni filtre à air, ni ventilateur, ni dynamo, ni pompe d'alimentation. Cette norme donne des résultats supérieurs à la précédente, mais n'intéresse pas l'utilisateur agricole.

En Allemagne, on utilise la norme DIN ; le moteur est muni de son système de refroidissement, de sa pompe d'alimentation et d'injection ; la dynamo tourne à vide ; le filtre à air est monté, ainsi que l'échappement.

Nous rappellerons que pour un tracteur de 100 chevaux-vapeur ou de 100 kilowatts SAE les diverses normes donnent les résultats suivants :

SAE ↓	→	100
DIN ↓	→	94 ± 1 %
O.C.D.É.	→	85 ± 2 %

5.1.2. Mesure de la puissance à la barre ou de l'effort de traction. — On peut procéder de deux façons :

— essais sur une piste normalisée en termacadam, d'abord avec des masses normalisées, ensuite sans celles-ci ; le tracteur traîne un camion chargé de le freiner ;

— essais sur un banc à rouleaux, le tracteur étant ancré et les roues motrices appuyant sur les rouleaux.

On détermine ainsi les valeurs des efforts de traction pour chaque rapport de la boîte de vitesses.

La structure du pneumatique intervient pour beaucoup ; le glissement est mesurable. Ces essais sont loin des conditions d'utilisations normales des tracteurs mais ils permettent une comparaison.

5.1.3. Autres essais obligatoires

— *Mesure de l'espace d'encombrement en virage, rayon de braquage*, etc.

— *Détermination de la position du centre de gravité et de la répartition statique des charges.*

— *Essai de freinage et du relevage hydraulique* (donc de tous ses organes).

— *Mesure du bruit émis* dans l'ambiance et au niveau des oreilles du conducteur. Ce dernier point est très important, car un bruit excessif peut entraîner des troubles graves chez les utilisateurs.

5.2. Essais facultatifs. — Dans le code de l'O.C.D.É. on peut faire des essais pour mesurer la puissance directement au moteur et la puissance disponible à la poulie pour les tracteurs qui sont encore équipés de cet accessoire. Il est aussi prévu des essais complémentaires de fonctionnement en atmosphères chaudes, de démarrage à basse température, etc., et également des essais de cabine et de cadres de sécurité.

Ce dernier point est très important, il se rattache à une conception générale de confort et de sécurité de l'utilisateur. Ce n'est que depuis quelques années que l'on s'est attaché à résoudre le problème. En 1963, un congrès de la Prévention sociale en agriculture, auquel participaient de nombreux médecins, a tiré la sonnette d'alarme. Il était courant jusqu'alors de construire un tracteur répondant à certaines normes techniques ; ensuite on rajoutait par-dessus un poste de conduite qui ne pouvait dans bien des cas qu'être inconfortable. Actuellement, le poste de conduite doit être conçu dans le bureau d'études, en même temps que l'ensemble du tracteur.

Sachant que les accidents les plus fréquents sont dus aux chocs, au renversement du tracteur et aux mouvements de rotation de la prise de force il est prévu :

— des cabines et des cadres de sécurité qui, en cas de renversement, empêchent que le conducteur soit écrasé par le tracteur,

— des carters de protection pour tous les organes en mouvement.

Par ailleurs diverses précautions sont prises pour éviter les troubles lents et insidieux, n'apparaissant qu'après quelques années d'utilisation du tracteur, dont les causes sont les secousses et vibrations, les bruits de fonctionnement, la toxicité des gaz d'échappement. Les effets en sont des déformations de la colonne vertébrale à différents niveaux, des troubles sensitifs, des troubles organiques : estomac, reins, oreilles, etc. Ces maladies peuvent être passagères mais elles peuvent devenir chroniques ou permanentes si aucune précaution n'est prise. Le siège, par sa conception, sa suspension, ses réglages possibles en fonction de l'individu, permet d'éliminer beaucoup de ces causes ; la cabine, si elle existe, doit être très étudiée, surtout au niveau sonore. De plus, les constructeurs cherchent à éliminer ou à diminuer toutes ces sources de troubles.

6. CONCLUSION

Nous avons jusqu'ici laissé de côté le problème du choix du tracteur. C'est une question difficile qui demande de longs développements : nous pouvons ici signaler les points importants du raisonnement. Il est impossible de fournir une réponse s'appliquant à chaque cas particulier. En effet le choix d'un tracteur se pose différemment selon qu'il s'agit :

— d'un premier équipement,

— d'un renouvellement d'un tracteur usagé,

— d'une augmentation du nombre de tracteurs sur une même exploitation.

Bien connaître l'exploitation. — C'est le point initial dont tout va dépendre ; le tableau I donne un résumé des principaux éléments à connaître.

Choix technique du tracteur. — En fonction de la fiche signalétique de l'exploitation et de ses besoins en heures de traction, on détermine les caractéristiques techniques du tracteur le mieux adapté à l'exploitation. Ce choix technique va porter :

— Sur la puissance du moteur équipant le tracteur ; c'est le problème le plus complexe car il est à multiples variables : nombre d'heures de traction nécessaire, puissance minimale pour effectuer certains travaux, puissance minimale pour effectuer ces travaux en temps voulu (nombre de jours disponibles, etc.).

Tout cela est lié à la nature du sol, au parcellement, au climat, aux techniques culturales, etc. Notons qu'actuellement il y a une tendance au suréquipement.

— Sur la qualité d'adhérence du tracteur : masse, répartition des charges, attelages, influence du relevage hydraulique, pneus, etc.

— Sur le type de moteur : le diesel s'impose en général, car à partir de 300 h de fonctionnement annuelles, du fait du coût de fonctionnement plus faible, on récupère le surcroît de capital investi. Le moteur à essence peut être justifié pour de petits tracteurs tournant un nombre d'heures très limité.

— Sur un ensemble de considérations techniques dont nous avons parlé : transmissions, attelages et relevages, prise de force, poste de conduite et sécurité.

— Sur le choix de la marque : en ce domaine le choix est en général déterminé par la proximité d'un concessionnaire, avec un service après-vente compétent et rapide.

Calcul économique. — Un tracteur techniquement adapté va faire varier les frais et les recettes (donc le produit brut) de l'exploitation. Le tableau II (page suivante) permet d'évaluer les charges dues au nouveau tracteur.

Les modifications de structures provoquées par le nouveau tracteur doivent augmenter les recettes ; la comparaison entre l'augmentation des recettes et celle des charges

Tableau I — Caractéristiques essentielles d'une exploitation influant sur le choix du tracteur

	Exemples	Influence probable du nouveau tracteur Importance à l'achat
Caractéristiques physiques	— Superficie — Nature des terres — Climat — Pentes — Parcellaire	Accroissement des terres labourées Pas d'influence Il faut envisager les modifications avant l'achat
Caractéristiques agronomiques	— Répartition des cultures sur le terrain et dans le temps — Techniques culturales ● Fertilisation ● Déchaumage ● Récoltes	— Augmentation des cultures intensives — Modifications toujours importantes, amélioration en général, avec augmentation des risques
Caractéristiques économiques et humaines	— Disponibilités en main-d'œuvre — Capital ● Disponibilités ● Emprunts possibles ● Matériels existants ● Matériels prévus — Équilibre de l'exploitation (marge) — Caractéristiques humaines ● Dynamisme de l'exploitant ● Age ● Famille, etc.	— C'est sur l'équilibre économique de l'exploitation que le nouveau tracteur aura le plus d'influence — Il y a une liaison étroite entre le matériel existant, le matériel prévu et le nouveau tracteur — Ces considérations psychologiques ont une grosse influence sur la décision d'achat ; on l'ignore trop souvent

détermine la marge supplémentaire possible ; cela permet donc de déterminer l'opportunité économique du choix effectué. Cependant, prévoir la variation des recettes est souvent très difficile.

Il n'est pas toujours nécessaire d'ailleurs de refaire tout le budget de l'exploitation pour justifier un choix ; un budget partiel portant sur les postes affectés par le changement peut suffire.

La critique. — À partir des trois groupes d'éléments ci-dessus, le problème critique se pose. Si la marge bénéficiaire qui apparaît est très importante, le choix doit se faire. Si la marge bénéficiaire est à la limite trois attitudes peuvent être adoptées :

— On renonce à l'achat individuel pour envisager un achat collectif ou conserver l'équipement antérieur.

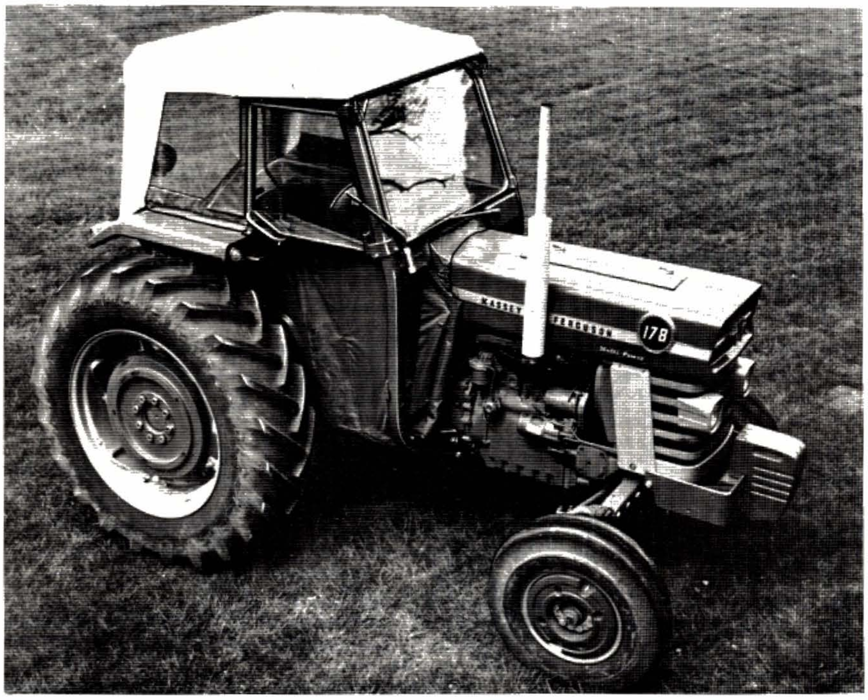
— On persiste dans le projet d'achat à titre individuel, mais en essayant de modifier les critères techniques (abandon de certaines améliorations, achat d'occasion, etc.).

— On accepte une diminution des bénéfices prévus en estimant que cette perte est largement compensée par les améliorations des conditions de travail.

Tableau II — Éléments pour établir le prix de revient d'une heure de tracteur

Postes du budget	Éléments de calcul	Formulation	Remarques
A) **Frais fixes annuels**			
1. Amortissement	— Valeur d'achat	A	Prix payé par l'agriculteur
	— Valeur de revente au bout de la période d'utilisation	R	En général, cote de l'Argus
	— Durée d'amortissement	N	D'autant plus courte que l'usage du matériel est intensif et qu'il est fragile
	— Annuités d'amortissement	$\frac{A - R}{N}$	
2. Intérêt du capital	— Le taux est de	x %	6 % par exemple,
	— Charges annuelles	$\frac{A+R}{2} \times \frac{100}{x}$	La demi-somme de la valeur d'achat et de la valeur de revente constitue le capital moyen engagé pendant la période d'amortissement
3. Frais divers	— Assurance — Remisage	1 % de la valeur en neuf souvent	
B) **Frais variables annuels**			
1. Carburants	— Travaux moyens	0,048 n P	• Pour du fuel à 0,40 F environ • n est la durée annuelle d'utilisation • P est la puissance
	— Travaux lourds	0,064 n P	
2. Lubrifiant			35 % de la dépense en carburant
3. Pneus	Durée moyenne 3 000 km	0,35 n prix à l'heure	En réalité ce nombre dépend de P
4. Entretien	15 % du salaire horaire d'un manœuvre	0,40 n	
5. Réparations	60 % de la dépense en carburant		Poste le plus difficile à évaluer

N.B. Il faut ajouter bien entendu le salaire du chauffeur

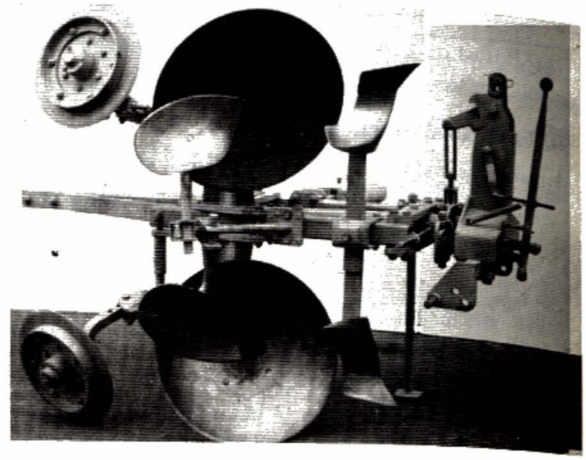


Tracteur équipé d'une cabine de sécurité avec deux cadres rigides, l'un devant, l'autre derrière le conducteur (*Massey-Ferguson*)

7. INTRODUCTION

La motoculture consiste à exécuter toutes les opérations agricoles à l'aide de machines ou instruments entraînés par des moteurs. Actuellement, les outils et machines agricoles sont simples et le tracteur est complexe ; dans une agriculture « riche » on pourra trouver des carter-outils entièrement équipés, sur lesquels il suffira de monter un bloc moteur interchangeable ; le terme de cette évolution peut-être la disparition du tracteur et le développement de la machine automotrice dans tous les secteurs.

La grande diversité des cultures, la grande diversité des sols qui les portent et les variations des propriétés physico-chimiques, d'un terrain à l'autre et dans le temps, justifient la multiplicité des formes et des caractéristiques technologiques des très nombreuses machines destinées aux travaux de culture. La « chaîne de culture » exige l'emploi d'instruments variés et spécifiques dont les caractéristiques sont choisies pour obtenir une consommation minimale d'énergie.



Charrue réversible à disque (*Beauvais et Robin*)

8. LES INSTRUMENTS DE TRAVAIL DU SOL

L'outil fondamental le plus employé pour découper et retourner la terre est encore la charrue (fig. XXVI-10 a et b) ; la charrue moderne est ainsi constituée :

— pièces supports : la tête d'attelage, le bâti avec l'age, l'étançon, la palette, le sep, le contre-sep avec son talon.

— pièces travaillantes (généralement en acier triplex) :

- Le coutre, destiné à découper verticalement la bande de terre.
- Le soc, destiné à découper horizontalement la bande de terre.
- Le versoir, destiné à la retourner en la brisant plus ou moins.

Ces différentes pièces ont quelquefois des formes différentes. Le coutre peut être un gros couteau à section cunéiforme ou un disque circulaire qui peut tourner autour d'un axe horizontal. La pointe avant du soc, partie qui s'use le plus vite, peut avoir des formes différentes destinées à prévenir cette usure : droite, bec-de-canard, carrelet, etc. Souvent, sur les charrues modernes, le coutre est rapporté sur la pointe du soc. Le versoir peut être cylindrique, hélicoïdal ou mixte. Les socs, d'une part, les versoirs, d'autre part, sont caractérisés par un certain nombre d'angles (entrure et attaque pour le soc, plus grande pente, bords inférieur et supérieur pour le versoir, etc.), qui permet de classer les charrues. Cela ne fournit pas une recette en vue d'obtenir un résultat ; ce n'est que la connaissance parfaite du terrain, d'une part, de son état physico-chimique au moment du labour, d'autre part, qui peuvent permettre de choisir un type de charrue. Un même terrain travaillé avec une même charrue donnera des résultats totalement opposés si son état est très différent au moment des travaux.

Certaines charrues ne permettent de retourner la terre que d'un seul côté (labours en planche) ; d'autres la retournent d'un côté dans le parcours aller, de l'autre au retour (labours à plat) : ce sont les charrues tourne-oreilles, les charrues réversibles et les charrues-balances. On trouve aussi des charrues à double versoir, retournant la terre des deux côtés : elles peuvent servir de buttoirs, de rechausseuses, de trancheuses, etc. Les charrues sont monosocs ou polysocs ; l'évolution se fait actuellement sur les pièces travaillantes de manière à pouvoir travailler à grande vitesse cela en vue d'utiliser au maximum les tracteurs de forte puissance (plus de 80 ch) qui ont un rapport poids/puissance peu élevé. Notons que les charrues peuvent être adaptées à certaines cultures (viticulture, arboriculture) ou à certaines opérations particulières (décavaillonnage, sous-solage, etc.).

L'ensemble coutre-soc-versoir peut être remplacé par une calotte sphérique en acier, à bord tranchant ; l'axe de la calotte fait un angle avec l'horizontale et la direction d'avancement. Au cours de l'avance de l'ensemble, la calotte tourne sur son axe et découpe une bande de terre à section elliptique, brisée et plus ou moins retournée ; ces charrues à disques sont très peu répandues.

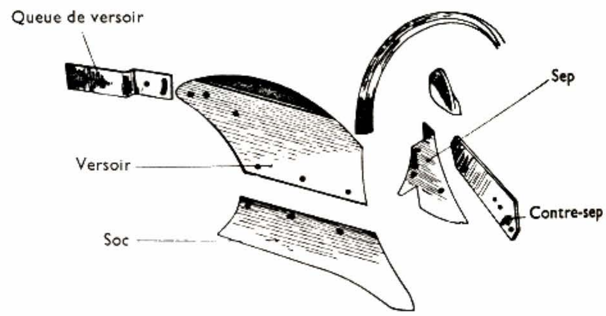
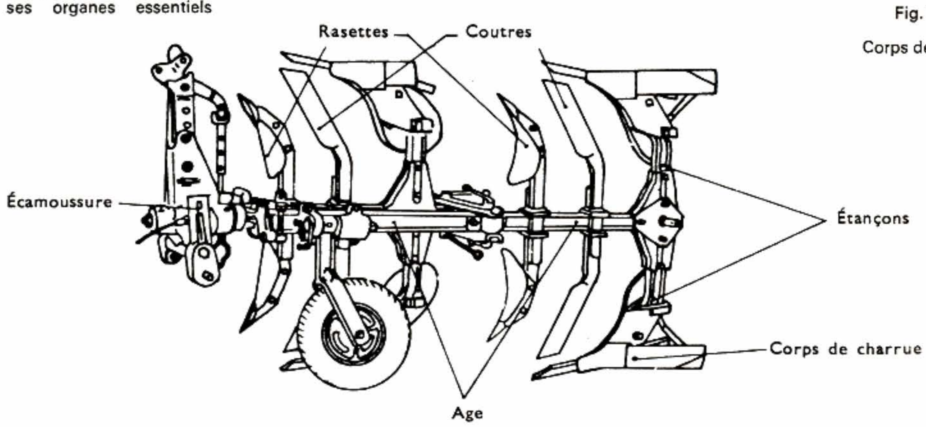


Fig. XXVI-10 b

Corps de charrue à soc

Fig. XXVI-10 a — Charrue classique à soc avec ses organes essentiels



On a essayé de remplacer les charrues par d'autres instruments, par exemple les *chisels* (c'est-à-dire ciseaux) ; cet appareil connaît une grande vogue aux États-Unis d'Amérique car il permet de travailler le sol à grande profondeur, vite, sans toucher trop à l'état de surface. Cela permet de conserver des sols fragiles, en particulier limoneux, et de lutter contre l'érosion, éolienne notamment. À partir de cela, en Europe, on a voulu utiliser le chisel n'importe où et n'importe comment, en oubliant ce pour quoi il a été fait.

La reprise des labours est destinée à la préparation des lits de semence ; le nombre d'appareils utilisés est très grands et la préparation se fait classiquement en plusieurs passages d'appareils différents : herses, canadiens, cultivateurs, extirpateurs, etc. En fait, on peut les classer comme suit :

1° *Les instruments à dents et à pointes rigides.* — Ce sont les herses ; elles sont destinées à émietter, assouplir et aplanir la couche de terre retournée par le labour ; ces herses peuvent avoir un bâti rigide, articulé ou rotatif. Parmi ces dernières, les herses à soleils sont très utilisées comme émotteuses. On utilise une herse lourde derrière un labour et une herse légère pour finir de préparer un lit de semence.

2° *Les instruments à dents et à pointes sur supports flexibles.* — Ce sont les cultivateurs, extirpateurs, scarificateurs, etc. ; ces instruments se distinguent davantage par les supports des pièces travaillantes que par celles-ci. Ils ont des sections carrées, rondes ou plates, et des formes droites, courbes ou enroulées qui leur permettent de vibrer plus ou moins d'avant en arrière, de gauche à droite, et vice versa, avec des fréquences différentes. Ces vibrations déterminent le travail effectué par les dents qui ont seulement deux formes possibles : triangulaire ou en croissant de lune.

Les cultivateurs modernes ont des supports à double courbure (Kongskilde, markstig), ce qui évite la remontée en surface de languettes de terre durcies, produites par les vibrations des dents en profondeur.

3° *Les instruments complémentaires.* — Ce sont notamment les rouleaux destinés à finir ou à compléter les travaux du sol. Ils peuvent être lisses, rainurés, ondulés, dentelés, etc. Ils sont presque toujours formés d'éléments de formes variables montés libres sur un même essieu ; ils peuvent tasser le sol, le briser, l'égaliser (crosskill, cultipacker, plombeur, squelette, etc.).

4° *Les instruments rotatifs.* — Ils sont entraînés par la prise de force du tracteur ; les pièces travaillantes sont montées soit sur des axes horizontaux perpendiculaires à la direction d'avancement, soit sur des axes verticaux ; seuls les systèmes à axes horizontaux se justifient actuellement, ne serait-ce que par l'énergie consommée. En réglant le nombre de dents sur l'axe, leur forme, leur place ainsi que la vitesse d'avancement du tracteur et la position du tablier arrière sur lequel la terre vient se briser, on peut obtenir tous les types de travaux, depuis le labour en grosses mottes jusqu'à la terre pulvérisée. Actuellement, on parle beaucoup de « travail minimal du sol ». Ce terme renferme une infinité de méthodes depuis le fait de supprimer un certain nombre de façons, ou de les regrouper en un seul passage, jusqu'à la suppression totale des labours et des façons superficielles assortie du contrôle de l'état de surface par des produits chimiques.

5° *Les instruments de façons superficielles à disques.* Ils sont fort peu répandus sauf les pulvériseurs, en particulier le cover-crop utilisé pour le déchaumage et les reprises de labours.

9. LA FUMURE — L'ÉPANDAGE DES ENGRAIS

Le fumier naturel et ses dérivés, purin et lisier, sont indispensables au sol, en particulier dans les situations où le taux de matière humique est faible. Le fumier peut être épandu de deux manières.

9.1. Méthode discontinue. — Des grues agricoles, mécaniques ou hydrauliques, ou des chargeurs montés sur le tracteur, portés sur l'attelage trois points ou sur l'avant du tracteur, permettent de charger des remorques. Sur le champ on forme des andains de fumier ou même des tas ; ensuite, on disperse le fumier à l'aide d'éparpilleurs attelés au tracteur et entraînés par la prise de force. Des types très nombreux d'appareils existent. Les plus simples sont des bâtis supportant des disques à axes verticaux ou horizontaux portant des palettes qui heurtent l'andain du fumier et le pulvérisent ; les plus complexes, et ceux qui donnent d'ailleurs le meilleur résultat quant à la répartition, sont composés de deux rotors à axes horizontaux perpendiculaires à la direction d'avancement ; le premier, de faible diamètre, tourne à environ 200 tr/mn et soulève la masse de fumier. Le second, formé par deux pas de vis hélicoïdale inversés, tourne à grande vitesse, pulvérise et projette ce fumier sur le champ. Entre ces deux catégories, il existe une multitude d'appareils plus ou moins simples.

9.2. Méthode continue. — Le chargement se fait sur des remorques épandeuses qui éparpillent directement le fumier sur le champ ; ces remorques comprennent un fond mouvant qui alimente ainsi l'organe éparpilleur, généralement constitué de hérissons en rotation à l'arrière de la remorque. C'est le nombre et la forme de ces hérissons qui différencient les remorques.

Le purin s'épand avec des tonnes simples à pression. Le problème est beaucoup plus complexe avec le lisier : l'étable doit être conçue pour l'évacuation facile du lisier, la cuve doit être d'une certaine forme pour faciliter sa vidange. Le lisier se stratifiant, il faut l'homogénéiser avant épandage ; cette dernière opération se fait en général dans des tonnes de grande capacité munies soit d'un compresseur-dépresseur qui fait le vide pour emplir la cuve et la met sous pression pour l'épandage, soit de pompes à vis d'Archimède qui ont l'avantage de ne pas faire de mousse dans le liquide. Le lisier étant très corrosif, il faut nettoyer ces pompes après usage.

Les engrais chimiques se présentent sous les trois états : solide, liquide et gazeux. Pour les engrais solides, pulvérulents ou granulés, deux grandes catégories d'appareils sont utilisés :

— Les appareils dont la largeur d'épandage est celle de la trémie de stockage ; un bâti à roues supporte une trémie et l'engrais est extrait puis dispersé à l'extérieur. Les organes d'extraction et de dispersion peuvent être séparés ou confondus. Ils sont entraînés par les roues porteuses du bâti, une boîte de vitesses étant souvent incorporée entre les deux ; le débit de l'appareil est proportionnel à la vitesse d'avancement. Ce sont les épandeurs à tapis, à assiettes, à vis hélicoïdale, etc.

— Les appareils épandant sur une largeur supérieure à celle de la trémie : ce sont les épandeurs centrifuges de petites ou grandes capacités. Les granulés d'engrais tombent sur un ou plusieurs disques entraînés à grande vitesse par la prise de force du tracteur ; ils s'éparpillent en nappe à l'arrière de l'appareil. Le débit se règle par l'ouverture d'une vanne située entre la trémie et les disques ; la dose épandue à l'hectare dépend en outre de la hauteur des disques au-dessus du sol et de la vitesse d'avancement de l'ensemble tracteur-épandeur. Ces appareils sont déconseillés avec les engrais pulvérulents.

On fabrique aussi des épandeurs faisant appel à d'autres principes ; citons les épandeurs pneumatiques et les épandeurs à vis hélicoïdales distribuant l'engrais dans des tubes de part et d'autre de la trémie.

Actuellement seul l'azote est distribué sous forme gazeuse en utilisant l'ammoniac anhydre. Le produit est stocké sous forme liquide dans les conditions normales, donc dans des réservoirs sous pression ; chaque fois qu'il y a transbordement d'un réservoir dans un autre, on passe par une vanne-pompe qui maintient un équilibre entre les phases liquide et gazeuse. L'épandage se fait en profondeur avec un appareil à dents du type scarificateur, appelé « nitrojecteur ». Un appareil permet d'assurer une bonne distribution entre les différentes dents. L'ammoniac peut aussi être distribué au labour.

En ce qui concerne les engrais liquides, solutions ou suspensions, on utilise les pulvérisateurs, appareils dont nous parlons plus loin.

Notons aussi que l'on peut épandre les engrais granulés avec des avions légers.



Appareil combiné pour l'implantation directe d'un semis de maïs sans labour préalable (*E.N.S.A. de Grignon*)

10. LES APPAREILS DE SEMIS

Le semis à la volée (manuel) est en voie de disparition. On utilise surtout des semoirs mécaniques dont les avantages sont considérables : distribution régulière soit en surface, soit en profondeur, économie de semence, augmentation du rendement grâce à une meilleure utilisation du sol due à une bonne aération et à la possibilité d'effectuer des opérations telles que le sarclage, favorables au développement de la plante.

Comme les épandeurs d'engrais, les semoirs sont composés d'une trémie et d'un organe d'extraction. Sur les semoirs en lignes, les plus répandus, l'extracteur est doublé d'un distributeur qui permet d'alimenter des tubes de descentes terminés par un système à socs ou à disques servant à enterrer les graines. Ce type de semoir en lignes est suffisamment précis pour les cultures classiques : blé, orge, avoine.

Ces semoirs se différencient surtout par l'organe d'extraction qui est :

— soit un cylindre cannelé pouvant coulisser transversalement dans un carter horizontal situé entre la trémie et le tube. Le débit dépend de la portion utile de la cannelure au-dessus du tube et de la vitesse de rotation du cylindre (celui-ci est entraîné par les roues porteuses). Le passage de la graine est forcée entre les cannelures et le fond du carter ;

— soit un cylindre muni d'ergots. Seule la vitesse de rotation du cylindre permet alors de régler le débit : entre les roues porteuses et l'axe supportant les cylindres ; dans ce deuxième cas il y aura une boîte de vitesses plus importante ; le passage de la graine n'est pas forcé.

Certains semis réclament une grande précision ; ce sont ceux qui concernent les cultures d'été : maïs, betteraves, petits pois, coton, arachides, etc. Les semoirs, dits de précision, ont un organe extracteur qui prélève les graines une à une et les distribue sur la ligne à intervalles réguliers. Une boîte de vitesses montée entre les roues porteuses du bâti et les organes extracteurs permet de régler l'intervalle entre les graines sur la ligne. Le problème est que les graines soient « mises en place » au fond du sillon, donc que la vitesse du grain, au moment où il arrive au sol, soit égale et opposée à la vitesse d'avancement du semoir. Dans la plupart des semoirs de précision on se contente de réaliser approximativement cette condition. Ces semoirs sont donc composés d'un bâti, d'un soc qui ouvre le sillon, d'une trémie avec l'organe extracteur distributeur et d'un élément de herse qui referme le sillon ; ces semoirs sont souvent combinés avec des localisateurs d'engrais. Il existe aussi des semoirs pneumatiques.

Un grand nombre de machines permet de mettre en terre des plants (planteuses) ou de les repiquer (repiqueuses).

Là aussi, on cherche à diminuer le nombre d'opérations et la peine de l'homme. Par exemple, on peut combiner sur le même bâti un rotavator et un semoir ; l'appareil travaille le sol en surface (5 à 6 cm) et enfouit devant le rotavator les graines distribuées par le semoir à la volée (semavator) ; ce système permet de travailler très vite sur un « mulch » (*tapis végétal discontinu*) de maïs récolté tardivement.

De nombreux constructeurs présentent ainsi des « associations d'outils » permettant de combiner le travail du sol, le semis, la fertilisation, la protection phytosanitaire, etc. Ces trains d'outils, montés sur des bâtis plus ou moins complexes, demandent des tracteurs très puissants. Des machines automotrices ont également été mises au point.

11. APPAREILS D'ÉPANDAGE DES PRODUITS ANTIPARASITAIRES ET ANTICRYPTOGAMIQUES

La lutte chimique contre les ennemis des cultures est certainement le procédé le plus utilisé ; les ennemis sont très nombreux et très divers : agents climatiques, insectes, champignons, etc. Les méthodes utilisées sont donc diverses et doivent être adaptées au cycle de l'agent à combattre.

Les matières actives, issues en général de la grosse industrie pétrolière, sont très diverses et assemblées en formules commerciales très nombreuses. Les supports de ces matières actives sont soit de l'eau, soit des huiles, soit des poudres.

Les pulvérisateurs sont les appareils les plus utilisés ; ils se différencient essentiellement par la manière dont la masse de liquide est divisée en fines gouttelettes (pulvérisation) et par le moyen choisi pour que ces gouttelettes atteignent la végétation (jet projeté et jet porté). Les plus répandus sont les pulvérisateurs mécaniques à pression à jet projeté (le liquide est mis sous pression dans un tube par une pompe ou par de l'air comprimé ; il est pulvérisé par passage à travers un orifice étroit, appelé gicleur ou buse) ; les gouttelettes obtenues ont une énergie propre suffisante pour atteindre la végétation (c'est le jet projeté). Pour les traitements délicats (contre les champignons) demandant à la fois une grande finesse et une bonne répartition des gouttes, on utilise la pulvérisation pneumatique (un violent courant d'air, produit par un puissant ventilateur, percute la veine de liquide, la divise en gouttelettes qu'il transporte sur le feuillage : c'est le jet porté). On trouve aussi des appareils mixtes : la pulvérisation est obtenue mécaniquement par une pompe, mais le transport des gouttes est obtenu à l'aide d'un courant d'air produit par un ventilateur.

Les poudreuses sont assez peu utilisées. En général, un courant d'air entraîne la poudre sur la végétation.

Les pulvérisateurs (et les poudreuses) ont des systèmes de rampes ou de buses adaptées aux différentes cultures pour lesquelles ils sont destinés. Ils sont portés ou traînés, ou même automoteurs. Ils sont adaptés aux engrais liquides en solution ou en suspension, et donc construits en matériaux anticorrosifs (matières plastiques ou aciers inoxydables).

Les traitements sur de très grandes étendues peuvent se faire par voie aérienne, en utilisant des avions légers ou des hélicoptères, équipés de rampes mécaniques ou pneumatiques ou même centrifuges.

Les principales modifications apparues ces dernières années portent sur les adaptations nécessaires pour l'utilisation des pulvérisateurs en épandage d'engrais liquides. Ces appareils doivent alors assurer une répartition rigoureuse du produit (azote, par exemple) et ne doivent pas être attaqués par lui. L'entraînement de la pompe se fait souvent par les roues porteuses de l'appareil (débit proportionnel à l'avancement). De plus, il faut disposer de forts débits à faible pression (pour éviter la formation de gouttes trop fines) et il faut pouvoir régler ces pressions très progressivement pour obtenir les diverses doses à l'hectare désirées; ce point de vue est en contradiction avec ce qui est demandé pour l'épandage des produits antiparasitaires et deux solutions sont actuellement adoptées:

— Soit l'utilisation de la pompe du pulvérisateur classique qui donne une pression voisine de 30 bars et d'un régulateur extrêmement complexe. Cela permet non seulement d'avoir les pressions ordinaires de traitements, mais aussi de descendre en dessous de 4 bars et de régler cette pression de 0,015 bar en 0,015 bar pour l'épandage des engrais.

— Soit l'utilisation de deux circuits en parallèle, l'un à haute pression, l'autre à basse pression, avec deux pompes. On trouve des pompes à pistons à course variable qui permettent d'avoir de gros débits à faible pression.

Les rampes des appareils utilisés pour les engrais liquides sont stabilisées ou montées de telle manière qu'elles restent parallèles au sol.

12. MACHINES DE RÉCOLTES

12.1. La récolte des fourrages. — La faucheuse est l'une des plus anciennes machines de récolte; c'est encore l'une des plus répandues. Elle est non seulement employée pour la récolte des fourrages, mais encore avec quelques modifications pour la récolte des céréales d'hiver. Un ensemble support avec des doigts séparateurs guide une lame animée d'un mouvement alternatif dont la vitesse moyenne est voisine de 2 m/s. Pour les faucheuses à traction animale, l'entraînement de la lame se fait par les roues porteuses du bâti. Celles à traction mécanique sont traînées ou portées par le tracteur et le mouvement de la lame est produit par l'intermédiaire d'un double joint de cardan à partir de la prise de force; ces faucheuses sont aussi appelées barres de coupes. Elles peuvent aussi être montées sur les motoculteurs et les porte-outils. La motofaucheuse est un appareil spécialement conçu pour la coupe des fourrages sur les pentes et les petites parcelles.

Deux autres types de faucheuses sont utilisés: la faucheuse à doubles lames superposées (Busatis) et la faucheuse à assiettes; cela permet de faucher avec une vitesse d'avancement de 12 km/h au lieu de 6 et, pour une barre de 1,50 m de large, de faire passer le rendement de 1 ha à 2 ha à l'heure.

Dans la méthode classique le dessèchement de l'herbe, de 80 % d'eau à 15 ou 20 % d'eau (foin), se fait souvent à l'air ambiant. L'opération de fanage consiste à retourner l'andain de fourrage en le dispersant; cette opération achevée, il faut rassembler le fourrage en andains pour faciliter la suite. Les opérations de fanage et d'andainage sont en général effectuées à l'aide du même appareil avec des réglages différents; les rateaux faneurs et andaineurs ont en général des mouvements rotatifs. Le type à « soleil » est le plus simple: de grandes roues avec des dents très fines sont montées libres sur leurs axes supports; l'angle de leur plan avec la direction d'avancement et le frottement sur le fourrage les fait tourner. Ces appareils très simples permettent un bon fourrage, mais seulement par retournement d'andain. Les rateaux faneurs-andaineurs à tambours, déjà utilisés avec la traction animale, sont les plus répandus actuellement; la prise de mouvement, avec plusieurs vitesses et inverseur, se fait à partir de la prise de force du tracteur. Ils permettent un excellent fanage et une mise en andain très correcte; il en est de même avec les rateaux à protection latérale qui sont un peu brutaux pour des fourrages fragiles tels que les légumineuses. Les faneuses à fourches ont disparu, mais les faneuses à toupies reviennent à la mode.

Pour accélérer la dessiccation de l'herbe et diminuer son temps d'exposition, on peut utiliser la technique qui consiste à écraser ou lacérer le fourrage. Les appareils dits rouleaux-conditionneurs comportent deux rouleaux (en fer cannelé ou en caoutchouc), de diamètres différents, qui happent l'andain et écrasent le fourrage. Ainsi, celui-ci sèche plus vite et dans de bonnes conditions. Ces appareils sont en général traînés et animés par la prise de force du tracteur. On fabrique aussi des faucheuses-conditionneuses, tractées ou automotrices, dont certaines peuvent avoir des barres de coupes de trois à quatre mètres. Les récolteuses à fléaux sont également utilisées mais elles demandent beaucoup de puissance.

Le ramassage se fait à l'aide de ramasseuses-presses; ces machines sont très répandues et actuellement ce sont les presses à moyenne densité qui représentent presque toutes les ventes. Le fourrage est mis en bottes liées à la ficelle, quelquefois au fil de fer. Les bottes sont laissées sur le champ et leur ramassage représente un problème délicat; de nombreux appareils sont proposés, depuis le simple traîneau à glissières jusqu'au chariot groupeur avec une griffe sur le tracteur qui permet de charger le tas de bottes sur une remorque, en passant par le lance-balle et la rampe de chargement montée derrière la presse-ramasseuse. Les appareils qui permettent de ramasser les bottes directement là où elles sont, une par une, sont très divers et d'un maniement difficile.

Il est à noter que le fourrage peut être ramassé après un léger préfanage et post-séché sous abri par ventilation froide ou chaude. Ces installations de séchage sont très complexes et doivent être rigoureusement calculées.

Le fourrage peut être ramassé en vrac: l'appareil moderne qui permet cela est la remorque autochargeuse. De grande capacité, en moyenne 25 m³, elle possède un tambour ramasseur à l'avant et des tasseurs qui refoulent et compactent la masse de fourrage dans la caisse. Elle est en général à vidange automatique et peut être utilisée non seulement avec le foin mais aussi avec le fourrage vert en vue de l'ensilage.

Cette méthode de l'ensilage est actuellement en expansion; bien conduite, elle permet de réaliser le minimum de pertes. L'ensilage peut être réalisé soit avec du fourrage à 80 % d'humidité, soit avec du préfané à 65 %, soit avec du semi-sec à 40 %; en fait, l'ensilage en préfané donne de meilleurs résultats.

La chaîne des opérations comporte la coupe, le ramassage, le hachage, le transport, le déchargement et l'ensilage. Un certain nombre de machines sont actuellement utilisées et plusieurs de ces opérations sont regroupées: ce sont les faucheuses-chargeuses, les faucheuses-hacheuses-chargeuses, les ramasseuses-hacheuses-chargeuses. Le fauchage peut être fait par une barre de coupe ou une faucheuse rotative ou à fléaux. Le hachage est en général fait par un système à couteaux, horizontaux à forme hélicoïdale ou verticaux à forme droite, animé d'une grande vitesse. Le déplacement de l'air produit par des pales assure le chargement par une goulotte. De nombreux points sont encore mal mécanisés dans les chaînes de récolte des fourrages: par exemple, le chargement des silos de types très variés et le désilage, la reprise du fourrage derrière une autochargeuse (elle suppose un appareil démêleur, sinon l'aéroengrangeur, par exemple, peut être obstrué).

Aux procédés précédents il convient d'ajouter la déshydratation des fourrages. (V. t. 2, Applications agricoles de l'électricité).

12.2. La récolte des céréales. — Autrefois, la récolte des céréales se faisait en plusieurs temps: coupe, ramassage, stockage, dépiquage. Il y avait donc plusieurs machines: faucheuses, moissonneuses-javeleuses, moissonneuses-



Moissonneuse-batteuse automotrice (*New Holland — E.N.S.A. de Grignon*)

lieuses, batteuses fixes. Toutes ces machines ont actuellement disparu et sont remplacées par la moissonneuse-batteuse ; c'est une machine combinée regroupant un ensemble de coupe et de rassemblement des céréales, avec un ensemble batteur et nettoyeur. Autrement dit, non seulement le produit est récolté directement sur le champ, mais il est aussi manipulé et conditionné en vue du stockage. Les tiges sont coupées puis rassemblées en un matelas compact ; un convoyeur les mène au batteur qui sépare les grains de leur enveloppe ; ensuite un système de nettoyage sépare les impuretés et les grains ; ceux-ci sont alors envoyés vers une trémie de stockage.

L'organe principal est le batteur ; c'est un ensemble de barres plus ou moins striées (battes) ou de dents montées sur les génératrices d'un cylindre ou d'un cône tournant à grande vitesse à proximité d'une grille fixe, appelée contre-batteur. Sous l'effet des chocs et de la pression, les grains sont dégagés de leur enveloppe. On estime que 90 % des grains passent ainsi à travers le contre-batteur avec des impuretés ; ils tombent sur un plan incliné qui, par oscillation, les convoie vers un ensemble de grilles montées sur un coffre animé d'un mouvement vibratoire. Un ventilateur souffle sur ces grilles et cela assure le nettoyage complet du grain : les balles et menues pailles sont expulsées vers l'extérieur.

À la sortie de l'ensemble batteur-contre-batteur, la paille renferme encore 10 % de grain ; elle progresse sur des éléments animés de mouvements alternatifs ou rotatifs, vers l'extérieur. Cela permet de récupérer encore 8 % des grains. Ils sont envoyés avec les autres sur le coffre de nettoyage (une moissonneuse-batteuse bien réglée ne laisse donc que deux pour cent de grain sur le terrain).

Les moissonneuses-batteuses peuvent être tractées ; la prise de force du tracteur fournit alors l'énergie nécessaire pour les différents organes. Le plus souvent elles sont automotrices.

Dans le cas des moissonneuses-batteuses tractées, la table de coupe est forcément déportée sur le côté du tracteur ; cela oblige à moissonner au préalable une bande plus ou moins large, tout autour de la parcelle, pour que l'ensemble tracteur-moissonneuse-batteuse puisse progresser sans passer sur la céréale. La moissonneuse-batteuse automotrice, avec la disposition frontale de la barre de coupe, n'a pas cet inconvénient.

Les moissonneuses-batteuses peuvent être munies de plate-forme d'ensachage pour le stockage du grain ; les sacs sont déposés sur le champ et il faut ensuite les ramasser. Actuellement et de plus en plus, les moissonneuses-batteuses sont équipées de trémies de stockage, dont la capacité moyenne est voisine de 1,5 à 2 m^3 ; ces trémies sont régulièrement déchargées dans des remorques, sans que le chantier soit interrompu. La récolte est ainsi directement acheminée vers le lieu de stockage.

La paille reste sur le champ, en général en andains réguliers ; elle peut alors être reprise par une ramasseuse-presse. La tendance qui se manifestait il y a quelques années, de monter des presses sur l'arrière de la moissonneuse-batteuse, a presque disparu ; la puissance moyenne des moteurs Diesel utilisés sur les moissonneuses-batteuses étant voisine de 50 chevaux, le débit de la machine était ainsi considérablement diminué.

Un grand nombre d'adaptations peuvent être montées sur une moissonneuse-batteuse ; elles permettent de l'utiliser pour d'autres récoltes : maïs, riz, tournesol, etc., et de la rentabiliser.

En ce qui concerne le maïs, la moissonneuse-batteuse doit être modifiée : la table de coupe est remplacée par un certain nombre de becs cueilleurs et les réglages, en particulier du batteur, du contre-batteur et du système de nettoyage, doivent être modifiés. En général, on préfère utiliser d'autres machines : *corn picker* et *corn sheller*.

Notons que pour le maïs fourrage destiné en général à l'ensilage, on n'utilise presque plus les moissonneuses-javeleuses à maïs (*corn snapper*) et les moissonneuses-lieuses (*corn binder*) ; on emploie les faucheuses-hacheuses dont nous avons déjà parlé, avec une adaptation à l'avant.

Dans le cas de la récolte en épis, on utilise la moissonneuse-dépanouilleuse (*corn picker*) ; l'épis est détaché de la tige par deux rouleaux à nervures hélicoïdales tournant en sens inverse et serrés l'un contre l'autre : la tige est écrasée et tirée vers le bas, l'épi ne passe pas et se détache ; ensuite il est dépouillé de ses enveloppes en passant sur un jeu de rouleaux à surface rugueuse et tournant deux par deux en sens inverse. Les épis sont ensuite repris par un élévateur et

soit déchargés dans une remorque, soit stockés dans une trémie incorporée à l'appareil et que l'on vidange de temps en temps. On fabrique aussi des moissonneuses-batteuses spéciales pour maïs, dites *corn shellers*.

12.3. Les récoltes diverses. — La récolte des pommes de terre n'est plus guère effectuée avec de simples buttoirs dont le double versoir était prolongé par des lattes de métal disposées suivant une surface conique ou plane ; cette grille permettait de retenir un peu les tubercules, de les nettoyer avant de les déposer sur le sol en andains plus ou moins bien formés. Les machines modernes possèdent en général un soc à l'avant qui soulève et déterre les tubercules ; le nettoyage est ensuite assuré soit par des systèmes à grilles rotatives à axes horizontaux ou verticaux, munis de dents élastiques (machines d'origine allemande), soit par des sortes d'élévateurs à grilles (machines d'origine américaine). Les pommes de terre sont andainées sur le sol et reprises par une ramasseuse-chargeuse ou directement chargées dans des bennes.

La récolte des betteraves est un peu plus complexe ; il faut tout d'abord couper les feuilles et les collets (effeuillage-décolletage), puis nettoyer et ramasser les betteraves. Deux types de chantiers sont possibles : le chantier décomposé dans lequel toutes les opérations sont faites l'une après l'autre, par des machines travaillant en général sur plusieurs rangs, et le chantier combiné où toutes les opérations sont faites simultanément en un seul passage. Les machines peuvent être simples et incorporées sur le tracteur à l'avant (effeuilleuse-décolleteuse), au centre (décolleteuse) et à l'arrière (arracheuse-nettoyeuse) ; elles peuvent être aussi complexes et même automotrices avec trémie de stockage.

La récolte mécanique du lin est faite non plus à partir des faucheuses adaptées, mais à partir de machine extirpeuse ; le but poursuivi est d'avoir un produit propre, sans ramasser aussi les adventices qui peuvent avoir envahi la culture. Ces extirpateurs sont surtout construits en U.R.S.S. et aux États-Unis d'Amérique. Ils comportent deux courroies en caoutchouc glissant l'une sur l'autre à la même vitesse et faisant un certain angle avec l'horizontale ; les tiges de lin sont serrées entre les deux courroies avec une certaine souplesse. Sous l'effet de l'avancement de la machine, de l'angle des courroies et de leur mouvement, les tiges sont extirpées du sol. Ces machines travaillent en général sur plusieurs rangs et laissent derrière elles, soit des javelles, soit des bottes liées. Il est à noter que ce principe de courroies d'extirpage est repris pour de nombreuses autres récoltes, de légumes, par exemple (carottes, céleri, etc.).

La récolte du chanvre peut aussi se faire par extirpation, mais on utilise plutôt les barres de coupe spécialisées.

Pour près de cent légumes et fruits cultivés sur de grandes surfaces se pose le problème de la main-d'œuvre lors de la récolte. Aussi trouve-t-on actuellement près de deux cents prototypes de machines de récolte. Les cerises, prunes, pêches, fruits durs (noix), myrtilles, olives, cornichons, oignons, pois, épinards, tomates sont récoltables mécaniquement ; les pommes, raisins, fraises, mûres, agrumes, brocolis, choux, choux-fleurs, concombres, laitues, melons, poivrons le sont presque ; d'autres études sont, bien entendu, en cours. Les blessures produites sur les fruits et légumes font que 60 à 90 pour cent des produits récoltés ne sont utilisables que par une industrie de transformation.

Le problème consiste bien sûr à séparer le produit consommable de son support, à le nettoyer et à le conditionner. En fait, dans la multitude des machines proposées, on peut voir que c'est le principe de séparation du produit qui est différent ; de ce point de vue, il y a sept grands groupes de machines :

— *Machines à secouage.* — Pour la plupart, les machines, sont constituées par une pince animée d'un mouvement de secouage mécanique pouvant saisir les branches une à une ou bien le tronc ; les produits sont pris en charge par une ramasseuse ou recueillis dans un réceptable placé sous l'arbre. Ce principe est utilisé pour les pommes, pêches, prunes, abricots, olives, café, noix et agrumes, mais il présente quelques inconvénients : écorce abîmée, fruits blessés par les chocs sur les branches. Il existe également des appa-



Machine à vendanger Bénac : les peignes à aiguilles vibratoires font tomber les raisins sur des réceptacles mobiles qui les convoient vers des trémies de stockage ; les transmissions et commandes sont entièrement hydrostatiques (*E.N.S.A. de Grignon*)

reils à vendanger, du type Chylsom-Ryder (États-Unis d'Amérique) ou Benac (France), adaptés pour la récolte des fruits poussant sur des arbustes (framboises, mûres, myrtilles et raisins). Ces machines sont équipées d'une série de tiges qui battent la végétation et font tomber les fruits dans un réceptacle. Sur les vendangeuses, le système qui passe de part et d'autre du rang dans la végétation est relié à un portique par un système pendulaire hydraulique qui lui permet de rester vertical. La tomate est aussi récoltée par secouage, soit direct, soit à l'aide de machines qui soulèvent les plants.

— *Machines à peignage.* — Des peignes sont montés sur des bandes continues, sur des cylindres creux ou sur l'avant de grilles animées de mouvements alternatifs pour détacher le fruit au niveau de son pédoncule. Ce principe est utilisé pour les myrtilles, les fraises et les haricots verts.

— *Machines à barre de coupe.* — Très souvent, elles comportent une scie circulaire à hauteur réglable. Ces machines sont utilisées pour la coupe des choux, laitues, épinards, brocolis, choux-fleurs et choux de Bruxelles.

— *Machines à extraction.* — Ces machines sont employées pour les plants tels que la carotte, le radis, le céleri. Il s'agit de saisir le plant au niveau des fanes à l'aide de deux bandes de caoutchouc se déplaçant en sens inverse et inclinées par rapport au sol.

Le système radiculaire est coupé par une lame à mouvements alternatifs. Le plant est alors soulevé puis décolleté à une longueur réglable, les pétioles étant éliminés. Une telle machine peut avancer à une vitesse de dix kilomètres par heure.

— *Machines à effeuiller.* — Ces machines servent principalement pour la cueillette des cornichons. Les plants sont soulevés pour que les fruits se détachent et des rouleaux, dont la surface est bien rembourrée pour éviter les blessures, les débarrassent de leurs feuilles.

— *Machines à écossage.* — Elles sont utilisées pour la récolte des pois. Les plants sont fauchés avec des barres de coupe, et ensuite, lorsque les cosses sont sèches, des batteuses mobiles passent dans les champs.

— *Machines à arrachage.* — Leur principe est celui des récolteuses de pommes de terre ou de betteraves ; elles servent pour la récolte des oignons et d'autres légumes identiques.

Bien entendu, l'utilisation de ces machines sur les fruits et légumes provoque souvent des modifications qui ont des conséquences soit agronomiques, sur la qualité ou sur les méthodes de conditionnement, soit économiques ou sociales et qui ne sont pas toujours les solutions souhaitées.

LA CONDUITE ET L'ENTRETIEN DES VÉHICULES AUTOMOBILES

CHAPITRE XXVII

CONSEILS PRATIQUES

1. MISE EN MARCHE DU MOTEUR

Tout d'abord le conducteur doit procéder à une rapide inspection portant principalement sur les points suivants :

— niveau d'huile dans le moteur ;
— niveau du carburant dans le réservoir ;
— niveau du liquide de frein ;
— niveau d'eau du radiateur (refroidissement par eau) ;
— état des pneumatiques (gonflage, sculptures, blessures éventuelles) ;
— pièces d'équipement de sécurité (projecteurs, feux divers, avertisseur, essuie-glace, rétroviseur).

Démarrage. — Tous les véhicules automobiles modernes sont équipés d'un démarreur électrique alimenté par la batterie d'accumulateurs ; mais pour des considérations de poids, d'encombrement et de prix, la capacité de celle-ci est limitée. Il ne faut donc pas la faire débiter inutilement.

La mise en route d'un moteur froid impose un débit considérable à la batterie. Si l'on fait tourner le démarreur sans arrêt pendant six à sept minutes, la batterie est complètement déchargée. Aussi est-il recommandé de ne pas agir sur la commande du démarreur pendant plus de cinq secondes et de laisser un intervalle de plusieurs secondes entre deux essais de démarrage.

S'il fait très froid ou, l'hiver, après un arrêt prolongé de plusieurs jours, l'huile est figée et, par suite, le moteur est « collé » ; si l'on dispose d'une manivelle il faut faire tourner le moteur à la main pendant quelques tours pour le « dégommer » (au besoin en déposant les bougies si la résistance est trop forte). On peut également emplir le radiateur avec de l'eau chaude. Si la batterie est déchargée, le véhicule doit être pris en remorque. Par temps chaud, le carburant contenu dans la cuve à niveau constant du carburateur s'évapore et la cuve est vide après quelques jours d'immobilisation. Si la pompe à carburant est munie d'une commande manuelle on l'actionne une dizaine de fois pour emplir la cuve et faciliter le départ. Dans le cas contraire il faut faire tourner le moteur au démarreur sans mettre le starter.

Pour faciliter le démarrage, les carburateurs possèdent un dispositif enrichisseur du mélange d'air carburé, appelé « starter ». Lorsque le moteur est lancé, il faut dès que possible, c'est-à-dire lorsque le ralenti est bien stable, annuler l'action du starter. Pour éviter cet oubli, certaines voitures sont équipées de starters automatiques.

Au démarrage l'huile du carter est froide et circule mal (le graissage est mal assuré). Pour éviter une usure anormale, il faut maintenir le moteur au ralenti pendant deux à trois minutes avant de démarrer le véhicule.

Il est dangereux de faire tourner un moteur au ralenti dans un garage clos. Les gaz d'échappement contiennent, surtout au ralenti, un certain pourcentage d'oxyde de carbone, gaz très toxique. En conséquence, toutes les manœuvres de démarrage du moteur doivent se faire, porte de garage ouverte.

2. CONDUITE ÉCONOMIQUE DES VÉHICULES

Grâce à quelques précautions, le bon conducteur peut diminuer notablement la consommation d'essence de son véhicule ainsi que l'usure du moteur.

Voici quelques règles à respecter :

— Limiter au minimum l'usage du starter.

— Embrayer progressivement et accélérer lentement.

— En ville, rouler sur l'étage de la boîte de vitesses le plus élevé possible, ne jamais utiliser toute la puissance du moteur et accélérer modérément aux reprises.

— Sur route la vitesse coûte cher. Pour chaque type de véhicule il y a une zone de vitesse économique qui est voisine de 70 à 80 % de la vitesse maximale.

— Le coup d'accélérateur brutal actionne la pompe de reprise du carburateur et chaque reprise coûte du carburant. Il faut donc éviter les reprises brutales et accélérer progressivement jusqu'à la vitesse économique.

— Ne pas attendre d'être sur l'obstacle pour freiner, mais prévoir la nécessité de ralentir ou de s'arrêter et actionner suffisamment à temps et progressivement le frein pour éviter tout à-coup générateur d'usure. Conduire en alternant les coups de frein et les reprises constitue un gaspillage. Le coup de frein brutal doit être l'exception et uniquement pour éviter un accident.

— Le réglage du carburateur doit rester conforme au réglage préconisé par le constructeur. Un réglage riche est onéreux et un réglage pauvre n'est généralement pas un réglage économique car les soupapes s'en ressentent.

— Les bougies doivent être nettoyées de temps en temps et l'écartement des électrodes doit être maintenu aux environs de 0,6 à 0,7 mm.

— Mettre l'avance maximale que peut supporter le carburant utilisé. L'avance est correcte si une accélération franche en prise directe, moteur à bas régime, ne donne tout au plus qu'un cliquetis de courte durée.

— Utiliser les qualités d'huiles et de graisses indiquées par le constructeur et respecter les intervalles indiqués entre les vidanges.

— Un moteur froid a un mauvais rendement; il faut utiliser un cache-radiateur par temps froid. Un moteur trop chaud souffre, il faut nettoyer le radiateur si les passages d'air sont obstrués.

— Prohiber la pratique de la « roulette », c'est-à-dire la descente des côtes au point mort. Conduire économiquement ne veut pas dire conduire imprudemment.

3. ENTRETIEN

La durée de service et la rentabilité du véhicule automobile dépendent non seulement de sa conduite mais aussi et surtout de son entretien. Une notice d'entretien établie par le constructeur est livrée avec chaque véhicule. Ses prescriptions doivent être exactement observées.

3.1. Graissage. — Le graissage est une opération capitale pour le maintien en bon état du véhicule, les prescriptions du constructeur doivent être scrupuleusement observées aussi bien pendant le rodage qu'en utilisation normale. Dans le cas contraire, d'abord la garantie du constructeur peut être perdue, ensuite on risque des ennuis mécaniques et une usure prématurée.

Grâce aux progrès de l'usinage et de la métallurgie, la période de rodage est actuellement de plus en plus réduite; elle dépasse rarement 1 000 à 2 000 km, ce qui ne veut pas dire que le rendement maximal soit obtenu à la fin de ce rodage. Pendant cette période, l'usager doit non seulement satisfaire aux prescriptions du constructeur concernant le graissage mais également respecter les limites de vitesse indiquées pour les différents étages de la boîte de vitesses, et soumettre son véhicule aux visites prévues chez le concessionnaire, visites qui sont généralement exécutées gratuitement. Pendant le rodage, l'usager doit également être très attentif aux moindres irrégularités qui peuvent se produire et les signaler au concessionnaire le plus tôt possible et au plus tard lors des visites systématiques.

En utilisation normale la fréquence des opérations à effectuer varie avec les types de véhicules et avec les organes du véhicule. Avec les progrès de la construction, ces opérations deviennent de plus en plus simples et de moins en moins fréquentes. C'est une raison de plus de les exécuter scrupuleusement.

3.2. Ravitaillements. — Les niveaux doivent être fréquemment vérifiés et les pleins doivent être faits en observant quelques précautions élémentaires :

1° *Plein d'eau.* — Éviter d'en renverser sur le moteur et sur les organes d'allumage. Si le moteur a chauffé par manque d'eau, attendre qu'il ait refroidi avant d'ajouter de l'eau froide, et se méfier du jet de vapeur en enlevant le bouchon du radiateur.

2° *Plein de carburant* (*essence, gasoil*). — Il doit être fait moteur arrêté et à l'abri de toute flamme. Si le remplissage est fait au moyen de bidons, vérifier la nature du liquide avant de le verser dans le réservoir. Employer l'entonnoir avec un tamis et une peau de chamois.

3° *Plein d'huile.* — Le véhicule doit être sur terrain plat. Toutes précautions doivent être prises pour éviter l'introduction d'impuretés dans le moteur. Le remplissage doit être soigneusement vérifié, car si l'huile dépasse le niveau « max » de la jauge, le moteur fumera et s'encrassera. Ne pas mélanger inconsidérément les types d'huile, en particulier faire le plein avec une huile détergente si le moteur n'a eu que de l'huile non détergente est très risqué, la mise hors service par dépôt de la calamine dispersée par l'huile détergente pouvant se produire très rapidement.

4° *Liquide de freins.* — Utiliser l'huile indiquée par le constructeur, marque et type. Une huile quelconque pourrait attaquer les coupelles de freins.

Vérifier que le trou d'équilibrage du bouchon de réservoir n'est pas obstrué.

Une baisse importante du niveau du liquide dans le réservoir peut avoir pour origine une fuite susceptible de devenir dangereuse. Une vérification s'impose.

5° *Liquide de lave-glace.* — Ajouter en hiver un peu de solution antigel.

CHAPITRE XXVIII

LES PANNES, LEURS CAUSES ET LEUR RECHERCHE

1. GÉNÉRALITÉS

Avec les voitures modernes, si elles sont bien entretenues et soumises à des vérifications périodiques sérieuses, les pannes entraînant l'arrêt absolu du véhicule sont très rares. Elles sont d'ailleurs généralement précédées par des signes avant-coureurs. Aussi, dès que l'on s'aperçoit d'une anomalie quelconque, généralement traduite par un bruit, des vibrations, des à-coups, des odeurs, faut-il rapidement en chercher la cause et y remédier; de cette façon on évitera toujours des frais qui peuvent être extrêmement élevés, et parfois même des accidents graves.

Le conducteur devra donc avoir constamment son attention en éveil, prêter une oreille attentive aux bruits et ne pas oublier que le tableau de bord comporte divers appareils de contrôle (température d'eau, pression d'huile, contrôleur de charge, etc.).

Une bonne inspection régulière de l'extérieur des organes est un excellent préventif qui permet de déceler les desserrages ou la perte d'écrous et les fuites d'essence ou d'huile qui précèdent des ennuis plus graves.

Néanmoins, les pannes existent. Il incombe alors à l'usager de se rendre compte s'il peut se dépanner par ses propres moyens, s'il peut continuer sa route en prenant quelques précautions ou s'il doit se faire dépanner par le garagiste le plus proche.

Les pannes peuvent intéresser le moteur, la transmission, la direction, le freinage, la suspension, l'éclairage. Sur ces cinq derniers points les manifestations sont généralement suffisamment nettes pour que les causes puissent être décelées ou localisées facilement. Il n'en est pas de même pour le moteur, dont les incidents de marche mettent en jeu non seulement la mécanique proprement dite, mais aussi la carburation et l'allumage, sans qu'il soit toujours facile de discerner facilement l'influence de l'une ou de l'autre.

Les recherches de pannes de moteur doivent toujours être conduites avec un esprit de méthode c'est-à-dire en procédant à un examen logique et systématique permettant les éliminations successives. C'est plus long mais toujours plus sûr que la recherche désordonnée par intuition.

On va examiner quelques pannes parmi les plus fréquentes en faisant remarquer qu'un usager non averti a souvent intérêt à s'adresser à un garagiste plutôt que de se lancer à l'aveuglette dans une remise en état qui peut causer plus de mal que de bien.

2. FONCTIONNEMENT ANORMAL DU MOTEUR

2.1. Le moteur ne part pas. — Cet ennui peut provenir du démarreur, de la carburation ou de l'allumage.

2.1.1. Démarreur

1° *Le démarreur ne tourne pas :* Plusieurs causes sont possibles :

— batterie à plat : il est nécessaire de la remplacer ou de la recharger;

— circuit électrique coupé : vérifier les bornes, contacts, masses, contacteur et balais du collecteur ;

— pignon lanceur coincé sur la couronne : on sent généralement que le démarreur peut partir (léger à-coup) : décoincer en tournant si possible l'arbre du démarreur en sens inverse du pas du *bendix*.

2° *Le démarreur tourne mais n'enclenche pas :*

— les dents de l'engrenage sont usées : le remplacer ;

— le pignon lanceur reste collé : nettoyer le pas de vis au pétrole ;

— le ressort du bendix est cassé ou le ressort n'est plus ancré : procéder à la réparation ;

3° *Le démarreur tourne trop lentement :*

— la batterie est déchargée : démarrer à la manivelle s'il y en a une ou faire pousser ou tirer la voiture ou descendre une pente ; à défaut, recharger la batterie ;

— il y a des pertes ou des mauvais contacts dans le circuit électrique : vérifier le circuit, nettoyer les bornes, le collecteur et les balais.

4° *Le démarreur tourne normalement.* — Dans ce cas, il faut incriminer la carburation ou l'allumage ou les deux à la fois.

On cherche d'abord à éliminer l'une des causes par un essai simple : on détache les fils de la bougie et, en les tenant par l'isolant, on les essaie successivement en les approchant de la tête de la bougie. On fait tourner le moteur au démarreur après avoir coupé l'arrivée d'essence car il est inutile de laver les cylindres. Si des étincelles franches jaillissent entre fil et tête de bougie, l'allumage peut être présumé innocent. Si les étincelles sont faibles ou irrégulières, il faut vérifier les bougies, l'écartement des électrodes, l'encrassement, l'humidité (flamber légèrement les bougies), l'état de l'isolant (cassure ou fêlure). Si après un remontage on constate une amélioration de la qualité des étincelles, on passe à l'examen de la carburation.

2.1.2. Carburation. — On suppose que le conducteur a vérifié que l'essence arrivait normalement au carburateur. La difficulté de démarrage provient d'une mauvaise carburation provoquée par une insuffisance d'essence malgré le starter ou par un excès d'air.

1° *Insuffisance d'essence.* — Gicleurs obstrués, eau dans la cuve du carburateur, filtre colmaté.

2° *Excès d'air.* — Le mélange carburé est trop pauvre par suite d'une rentrée d'air intempestive. Elle peut provenir :

— de joints abîmés (joint entre carburateur et pipe d'admission, joint de culasse) ;

— de l'usure de l'axe du papillon du carburateur ;

— du coincement de l'axe du papillon qui reste grand ouvert ;

— de la rupture d'un tube faisant communiquer la pipe d'admission avec un dispositif quelconque mû ou contrôlé par la dépression ;

— de l'usure anormale des guides de soupapes.

2.1.3. Allumage. — Si les essais préliminaires relatifs à l'allumage n'ont pas donné satisfaction, il y a lieu de vérifier le circuit d'allumage.

On suppose a priori que la batterie est en bon état et convenablement chargée puisque le démarreur fonctionne très correctement. On admet également que le contact d'allumage a été mis.

On vérifie l'allumage section par section. Les principales causes d'incidents peuvent être les suivantes :

1° *Circuit primaire*

a) *Le courant n'arrive pas au rupteur.* — On le vérifie en débranchant le fil d'arrivée et en l'approchant d'une masse. Une étincelle doit jaillir, sinon vérifier les contacts et les conducteurs entre batterie et rupteur.

b) *Le rupteur est accidentellement à la masse.* — Après avoir séparé les contacts du rupteur par un isolant (feuille de papier) on vérifie l'isolement du rupteur au moyen d'un tournevis à manche isolant placé entre rupteur et masse. Une étincelle doit jaillir.

2° *Circuit secondaire*

a) *La bobine est « claquée ».* — Pour le vérifier on amène les plots du rupteur au contact franc et on détache le fil central du chapeau du distributeur. Si l'on provoque des ouvertures et fermetures alternatives rapides du circuit primaire par action sur le linguet on doit pouvoir faire jaillir des étincelles longues de plusieurs millimètres entre fil central et masse.

b) *Distributeur humide ou fêlé.* — Dans ce cas, le courant n'arrive pas aux bougies. Il faut essuyer le distributeur avec un linge très sec s'il est humide ou le remplacer s'il est fêlé.

2.2. Le moteur s'arrête. — Cet incident peut provenir soit d'un arrêt dans l'alimentation d'essence, soit d'un arrêt de l'allumage, soit de la rupture ou du coincement d'un organe (bielle, piston, axe de piston).

Dans le premier cas, le moteur ne s'arrête qu'après avoir eu plusieurs retours au carburateur, signe caractéristique d'un mélange trop pauvre en essence. La vérification se fait immédiatement en enlevant le couvercle du carburateur, ce qui permet de constater si l'essence arrive bien dans la cuve à niveau constant. Dans l'affirmative, vérifier ensuite, en le démontant, que le gicleur n'est pas bouché par un petit corps étranger.

Il arrive souvent que l'arrêt du moteur, après des retours au carburateur, soit provoqué par la présence d'eau dans l'essence. Cette eau, qui ne se mélange pas à l'essence, est facilement visible dans le fond de la cuve à niveau constant ; après avoir enlevé le flotteur il faut éponger cette eau avec un chiffon. On peut être amené à vidanger le réservoir et à filtrer l'essence contenant de l'eau (on utilise une peau de chamois que l'eau ne peut pas traverser).

Dans le cas où l'essence n'arrive pas dans la cuve à niveau constant, bien que le réservoir à essence ne soit pas vide, il faut vérifier que la pompe d'alimentation fonctionne normalement et que le tuyau d'alimentation du carburateur et le filtre ne sont pas bouchés.

Lorsque le moteur s'est arrêté sans produire de retour au carburateur, il faut, en premier lieu, incriminer l'allumage. Pour le moteur, dévisser une ou plusieurs bougies, que l'on pose sur les cylindres de façon que leur douille métallique soit à la masse et, en les laissant réunies à leurs fils respectifs, faire tourner le moteur et regarder si des étincelles jaillissent entre les électrodes des bougies. Si aucune étincelle ne se produit, il faut vérifier l'allumage section par section.

Dans le cas de l'allumage par batterie, il peut arriver qu'un fil de la bobine soit cassé ; on s'en rend compte en vérifiant que le courant arrive bien à la bobine (en mettant à la masse le fil d'arrivée, ce qui donne des étincelles) mais qu'il n'y a pas production d'étincelles à la bougie. Si la bobine est bonne, il y a lieu de vérifier l'écartement des vis platinées du distributeur et de les remplacer éventuellement si leur usure est trop prononcée.

Il peut arriver qu'un moteur en période de rodage s'arrête par suite d'un ajustage trop rigoureux des pistons dans les cylindres au moment du montage ; on dit que les pistons serrent et il faut alors laisser refroidir le moteur puis le faire tourner très lentement.

2.3. Marche irrégulière du moteur. — Cette marche irrégulière est caractérisée soit par des ratés ou défauts d'allumage, qui se reconnaissent à des irrégularités dans le rythme du moteur, soit par des explosions au carburateur, soit par des explosions dans le pot d'échappement.

2.3.1. Ratés. — S'ils se produisent toujours au même cylindre, il y a un manque d'allumage à ce cylindre, dû soit à une mauvaise bougie (électrodes trop écartées ou court-circuitées), soit à un court-circuit sur le fil secondaire alimentant la bougie, soit à un fil débranché ou mal connecté (contacts intermittents par trépidation). Lorsque les ratés se produisent d'une manière irrégulière, vérifier la système distributeur ou la magnéto.

2.3.2. Explosions au carburateur. — Nous avons vu qu'elles étaient généralement produites par un manque d'essence. Effectuer les vérifications décrites ci-dessus dans le cas de l'arrêt du moteur. S'assurer, en outre, que le filtre

d'essence n'est pas encrassé. Il peut également se produire une aspiration d'air par la tuyauterie d'aspiration : vérifier les joints de cette tuyauterie. Les explosions au carburateur peuvent également être provoquées par une soupape qui ferme mal : ressort de rappel cassé (le changer), soupape usée (la roder) ou soupape cassée (la changer).

2.3.3. Auto-allumages. — Il arrive parfois, après quelques instants de marche du moteur à pleine allure, que des retours au carburateur se produisent de plus en plus fréquemment ; après un arrêt de quelques minutes, la marche du moteur reprend normalement pour donner lieu, au bout de peu de temps, à de nouveaux retours. Ces phénomènes sont la caractéristique des auto-allumages.

Ceux-ci consistent en un allumage du mélange gazeux à l'intérieur du cylindre avant le moment normal où il devrait se produire. Ils sont dus à une ou plusieurs bougies dont les électrodes restent incandescentes et enflamment le mélange à un moment quelconque de la compression ou pendant l'aspiration. Il faut alors changer la bougie qui produit ces auto-allumages ; elle se reconnaît généralement à sa teinte bleue caractéristique d'un échauffement anormal.

2.4. Autres anomalies de fonctionnement du moteur tournant régulièrement

2.4.1. Le moteur ne tire pas. — Il manque de compression, ou il est mal réglé.

S'il manque de compression et si l'on peut disposer d'une manivelle en le faisant tourner à la main on se rend compte que le passage de la phase compression se fait sans effort. Comme actuellement la manivelle est de plus en plus rare il faut avoir recours à un compressiomètre, petit appareil qui se monte à la place d'une bougie et qui, si on fait tourner le moteur chaud au démarreur, donne la pression maximale obtenue dans le cylindre avant allumage. Les cylindres sont testés l'un après l'autre ; il est particulièrement important que les différents cylindres accusent des pressions sensiblement égales.

Si le moteur est mal réglé c'est que, le plus souvent, l'avance ne convient pas ; il se peut aussi que le carburateur soit déréglé ou que la distribution soit mal calée, grippée ou ait un ressort cassé.

Pratiquement, quand le moteur ne tire pas, un usager non averti a intérêt à consulter un garagiste.

2.4.2. Le moteur chauffe. — On peut s'en apercevoir d'après le thermostat ou, à défaut de celui-ci, par la vaporisation de l'eau et le « cognement » du moteur produit par un auto-allumage naturel.

Un excès ou un défaut d'avance ainsi qu'une mauvaise carburation donnent naissance à un échauffement du moteur. Le défaut de graissage (fuite d'huile, consommation exagérée, mauvaise huile, pompe à huile défectueuse, etc.) détermine un échauffement rapide du moteur et le grippage des bielles et des pistons. Un mauvais refroidissement dû à une fuite d'eau, à un radiateur bouché ou à une mauvaise ventilation (courroie cassée ou détendue), est également une cause d'échauffement du moteur. Il faut éviter de mettre de l'eau calcaire dans le radiateur, de façon à éviter l'entartrage. Si le radiateur est entartré, il faut le nettoyer avec une solution légère d'acide chlorhydrique.

2.4.3. Le moteur vibre. — Les vibrations provenant du moteur se transmettent au volant de direction et au châssis de sorte qu'il est aisé de s'en apercevoir. Mais des vibrations anormales peuvent provenir de jeux dans la fixation du moteur au châssis, du jeu longitudinal du vilebrequin (sensible surtout au ralenti et disparaissant quand on débraye) ou d'une mauvaise fixation du bloc-cylindres sur le carter (le bloc se soulève à chaque explosion ; les boulons sont à resserrer). Il ne faut pas confondre les vibrations du moteur avec le *shimmy* ou le dandinement, ces phénomènes n'ayant trait qu'à la direction et à la suspension.

2.4.4. Le moteur est bruyant. — Il y a deux sortes de bruits à distinguer, ceux qui proviennent de l'intérieur du moteur (cliquetis, claquement, cognement) et ceux dont l'origine est la distribution ou l'axe de piston. Ces derniers sont dus à un jeu exagéré des tiges de soupape dans leurs guides, dans des culbuteurs ou dans l'axe de piston ; ce sont des bruits métalliques variant peu avec l'allure du moteur. Sauf en ce qui concerne les culbuteurs, presque toujours bruyants, ils témoignent d'une usure plus ou moins prononcée.

— *Le cliquetis* est un bruit métallique sec dû au choc du piston sur son axe pendant la phase explosion. Il ne se produit pratiquement que sur les moteurs à quatre temps et en principe jamais sur les moteurs à deux temps car dans ces derniers c'est la même génératrice de l'axe du piston qui appuie constamment sur le piston, alors que dans le moteur à quatre temps, le piston est tantôt poussé par la bielle (compression) et tantôt il pousse la bielle (explosion et détente). Ce choc désagréable est l'indice d'un excès d'avance à l'allumage ou d'un carburant dont l'indice d'octane est trop faible pour le moteur. Dans les deux cas, la combustion est trop brutale et le moteur fatigue énormément. Tout cliquetis persistant exige une correction immédiate.

— *Le claquement* est un bruit métallique sec dû au piston qui balance autour de son axe et vient frapper le cylindre. Si le claquement ne se fait entendre qu'à froid pour disparaître rapidement, il provient de la différence des coefficients de dilatation du piston et du cylindre, ce qui oblige à laisser un jeu important à froid pour qu'à chaud il n'y ait pas serrage. Le claquement est alors normal et ne doit pas inquiéter. S'il persiste à chaud c'est que le jeu entre piston et cylindre est trop important à chaud, le moteur est vraisemblablement ovalisé et devra être réparé dès que la compression sera trop faible.

— *Le cognement* est un bruit sourd provenant du choc de la tête de bielle sur le maneton. Il indique que le régule a coulé (on dit que la bielle est « coulée »). Il y a eu défaut de graissage soit par manque d'huile, soit par température trop élevée. Le moteur doit être arrêté d'urgence et la voiture conduite en remorque à l'atelier.

2.5. Fumées à l'échappement. — L'article premier de l'arrêté du ministère des Travaux Publics, du 12 novembre 1963 indique « que les moteurs des véhicules automobiles doivent être conçus, construits, réglés, entretenus, alimentés et conduits de façon à ne pas provoquer d'émissions de fumées nuisibles et incommodantes ».

Bien que rédigés sous une forme très générale, cet article et les suivants visent surtout les moteurs Diesel. En effet si les moteurs à allumage commandé, alimentés à l'essence, « fumaient » encore, il y a trente ou quarante ans, par suite d'excès de graissage, cet inconvénient a aujourd'hui totalement disparu sur les véhicules automobiles ; il est à peine remarqué sur les moteurs à deux temps des motocycles lorsque le mélange carburant est un peu trop chargé en huile.

En revanche, dans les moteurs Diesel, un déréglage de la pompe, un régime plus élevé que celui prévu par le constructeur, des injecteurs usés font que la combustion peut être incomplète, ce qui se traduit par une coloration noirâtre plus ou moins accentuée des gaz d'échappement. Elle provient de la présence de suie grasse, c'est-à-dire de particules de carbone chargées d'hydrocarbures mal brûlés. Ces suies goudronneuses sont non seulement désagréables (odeur) et dangereuses (perte de visibilité pour les autres usagers de la route), mais elles sont suspectées d'être cancérigènes.

L'arrêté du 12 novembre 1963 précité a été pris dans le cadre de la lutte contre la pollution de l'atmosphère. De ce fait, les infractions constatées sont assimilées à des délits et frappées d'amendes très lourdes ; les peines peuvent aller jusqu'à l'emprisonnement.

Il est donc de l'intérêt de l'usager de prendre toutes précautions pour empêcher le moteur de fumer, d'autant plus que la fumée est le signe d'une marche peu économique.

Mesure de l'émission de fumée dans les gaz d'échappement. — Cette mesure est exécutée au moyen d'appareils dits « opacimètres » ou « fumimètres » (*smokemeters*). Ils appartiennent en général à l'un des deux types suivants :

— Noircissement d'un papier-filtre traversé par une quantité déterminée de gaz d'échappement et mesure de la lumière réfléchie par ce papier plus ou moins noirci.

— Passage d'un rayon lumineux à travers une colonne parcourue par les gaz d'échappement. Le rayon lumineux est reçu sur une cellule photoélectrique. L'opacité est mesurée par la quantité de lumière absorbée par les gaz d'échappement.

C'est ce dernier type d'appareil qui permet des contrôles rapides même sur route, et qui a été retenu par le ministère des Travaux Publics. Le cadran de l'appareil comporte une graduation, divisée en cent unités, qui va de l'opacité nulle à l'opacité complète.

Pour les véhicules neufs livrés par le constructeur, la mesure ne doit pas excéder les valeurs indiquées ci-après :

Catégories de véhicules	Opacité Nombre d'unités
Voitures particulières	40
Autobus et autocars	45
Véhicules industriels et commerciaux de moins de 6 t de masse totale	45
Véhicules industriels et commerciaux de 6 à 19 t de masse totale	50
Véhicules industriels et commerciaux de plus de 19 t de masse totale	60
Véhicules et tracteurs agricoles	60
Véhicules spéciaux de travaux publics	60

Cette mesure est exécutée suivant un processus bien défini : véhicule à l'arrêt, moteur accéléré depuis le ralenti jusqu'à sa vitesse maximale d'utilisation pratique.

2.6. Bruits à l'échappement. — Les arrêtés des 3 avril 1957, 6 juillet 1959, 25 octobre 1962, 12 novembre 1963 du ministère des Travaux Publics ont fixé le niveau maximal du bruit émis par les échappements des véhicules et la méthode pour le mesurer. Le tableau ci-après donne ce niveau en décibels avec tolérance d'un décibel pour les différentes catégories de véhicules.

Catégories de véhicules	Niveau maximal en décibels
Cyclomoteurs	76
Vélomoteurs	80
Motocyclettes et motoculteurs	86
Véhicules utilitaires de masse en charge inférieure à 3,5 t	83
Voitures particulières	83
Véhicules de transport en commun	90
Véhicules de masse en charge	90
supérieure à 3,5 t	90
Tracteurs agricoles	90
Machines agricoles automotrices	90

2.7. Toxicité des gaz d'échappement et des gaz émis par le carter

2.7.1. Gaz de carter. — L'arrêté du 28 juillet 1964 du ministère des Travaux Publics a fixé dans son article premier la quantité maximale d'hydrocarbures que les gaz émis par le carter peuvent contenir. Elle est actuellement de « 0,15 % de la masse du combustible consommé pour les moteurs à explosion à quatre temps ».

Pratiquement les gaz de carter sont en grande partie éliminés par un dispositif de *blow-by* qui permet de renvoyer dans la pipe d'admission les gaz se trouvant dans le carter ; l'aspiration du moteur est suffisante pour les entraîner.

2.7.2. Gaz d'échappement. — L'arrêté du 31 mars 1969 du ministère des Travaux Publics relatif à la limitation de la teneur en monoxyde de carbone des gaz d'échappement des véhicules automobiles émis au régime de ralenti stipule :

— Dans l'article premier : que les véhicules automobiles équipés d'un moteur à essence à quatre temps et dont la masse autorisée en charge n'excède pas 3,5 t doivent être réglés et entretenus de façon à ne pas émettre au régime du ralenti, à vide, des gaz d'échappement dont la teneur en volume en monoxyde de carbone dépasse 4,5 %. Cette prescription n'est pas applicable aux véhicules dont la puissance administrative n'excède pas 1 ch (736 W).

— Dans l'article 2 qui fixe les conditions d'essai : que pour tenir compte des dilutions possibles dues à des entrées d'air dans les circuits d'échappement, on mesurera les taux T_1 et T_2 des gaz d'échappement en monoxyde de carbone (CO) et en dioxyde de carbone (CO_2), et la teneur T à comparer à la limite fixée sera calculée par la formule :

$$T = T_1 \frac{0{,}15}{T_1 + T_2}$$

— Dans son article 5 : que seuls pourront être soumis à des contrôles les véhicules en circulation ayant un kilométrage d'au moins 3 000 km.

— Dans son article 6 : que les dispositions du présent article étaient applicables à partir du 1er janvier 1970 aux véhicules immatriculés pour la première fois à partir du 1er janvier 1960, avec tolérance de 1 % jusqu'au 1er janvier 1971. Toutefois, pour les véhicules équipés de moteur dont l'alimentation se fait par injection, le présent arrêté n'était applicable que si leur mise en circulation était postérieure au 1er janvier 1971.

2.7.3. Règles à respecter dans le cas des moteurs Diesel

Carburant. — Le carburant doit être un gasoil du commerce, répondant aux spécifications légales, sans addition, ni fraude. Il doit être bien filtré. En particulier, le fuel domestique est à prohiber.

Pompe d'alimentation. — Elle doit être bien calée et bien réglée pour chacune des injections de chaque cylindre. La butée de débit de la pompe ou le régulateur ne doivent pas être déréglés pour permettre la surcharge du moteur soit en couple, soit en régime.

Injecteurs. — Les injecteurs doivent être bien tarés ; ils ne doivent pas couler ni au ralenti ni à chaud (par suite de dilatation quand le moteur est à pleine puissance).

Si l'on n'y prend garde, les injecteurs se bouchent ou les aiguilles intérieures se coincent. Ces incidents sont souvent dus à un manque de soin lors du remontage de l'injecteur sur le porte-injecteur. Il suffit en effet de quelques grains de calamine pour en troubler le fonctionnement. Des appareils d'essais relativement simples permettent de vérifier que les injecteurs pulvérisent bien le liquide et que la pression d'injection est conforme aux indications du constructeur.

Entretien du moteur. — Les taux de compression de chaque cylindre doivent être aussi égaux que possible et maintenus à leur valeur d'origine, ce qui nécessite un bon état des pistons, des segments et des cylindres, c'est-à-dire un examen périodique et un bon entretien.

Conduite du véhicule. — Le véhicule doit être bien conduit, c'est-à-dire que le conducteur doit toujours utiliser l'étage de la boîte de vitesses permettant de maintenir le moteur à un régime aussi voisin que possible du régime pour lequel la consommation est minimale.

3. FONCTIONNEMENT ANORMAL D'UN ORGANE AUTRE QUE LE MOTEUR

Il n'est question que des organes conventionnels. Les organes automatiques sont à la fois trop compliqués et de types trop divers pour qu'il soit possible de donner des conseils généraux autres que d'avoir recours à un atelier qualifié dès que l'on constate une anomalie.

3.1. Embrayage

3.1.1. Embrayage qui patine. — Un embrayage patine lorsque le moteur tournant normalement, la voiture n'avance qu'à une vitesse bien inférieure à celle qu'elle devrait avoir ;

dans une côte, le moteur a tendance à s'emballer alors que la voiture n'avance presque plus. Cette anomalie peut être due à un mauvais réglage de la course de l'embrayage, à des ressorts d'embrayage devenus trop faibles, à l'usure des garnitures, à une arrivée d'huile intempestive.

3.1.2. Débrayage incomplet. — Il peut arriver que le débrayage ne se fasse pas complètement et que, par suite, on éprouve de grosses difficultés à changer de vitesses. Il y a lieu de vérifier si la course de débrayage est suffisante pour séparer les plateaux et les disques et de modifier éventuellement le réglage des butées. Dans le cas d'embrayage à disques fonctionnant à sec, vérifier si ceux-ci ne sont pas gauchis et remplacer les disques défectueux.

3.1.3. Embrayage brutal. — Vérifier dans ce cas les dispositifs de progressivité (ressorts, blocs de caoutchouc).

3.2. Boîte de vitesses

3.2.1. Manœuvres difficiles du changement de vitesses. — S'il n'est pas possible de prendre une vitesse, il faut vérifier si un coulisseau n'est pas grippé, si une fourchette n'est pas détériorée. Si aucune vitesse ne passe, il y a lieu de vérifier la rotule du changement de vitesses, les fourchettes et le système de verrouillage.

Si une vitesse « saute » constamment et que le levier revient au point mort, il faut en conclure que le verrouillage automatique relatif à cette vitesse ne fonctionne pas ou encore que les pignons correspondant à cette vitesse sont très usés.

3.2.2. La boîte de vitesses fait du bruit. — Si le bruit se présente sous forme de chocs répétés périodiquement, il faut craindre qu'une dent ne soit cassée et dans ce cas il est à conseiller de faire toujours remorquer la voiture.

Si le bruit se présente sous forme de grincement, vérifier si la boîte contient suffisamment d'huile, la remplir jusqu'au niveau indiqué par le constructeur. Si le bruit persiste, il est dû à une usure des pignons qu'il faut alors remplacer.

Des jeux anormaux dans les roulements à billes des arbres de la boîte donnent également naissance à des ronflements désagréables.

3.3. Transmission. — Si le pont arrière ronfle, cela peut provenir d'un manque d'huile, d'une huile devenue trop épaisse, d'une usure anormale des pignons du couple conique ou d'un mauvais réglage. Si l'on ressent des chocs qui se reproduisent périodiquement, la cause est due vraisemblablement à la rupture d'une dent du couple conique (ce dernier sera à remplacer) ou à des roulements abîmés. Si l'on ressent des chocs seulement aux changements d'allure du véhicule, il faut incriminer les jeux anormaux des cardans et le jeu entre le pignon d'attaque et la couronne.

Si l'on entend du bruit dans le pont, uniquement dans les virages, il faut incriminer les pignons du différentiel (dents cassées).

Il peut arriver que le moteur, la boîte de vitesses et l'arbre de transmission tournent et que les roues ne bougent pas : cela peut provenir d'un joint de cardan détérioré, d'un demi-arbre de pont cassé ou d'un pignon d'attaque déclaveté.

Des grincements ou des chocs provenant de l'arrière de la voiture peuvent être dus également à un clavetage défectueux d'une roue sur l'arbre de pont, à un roulement détérioré, etc.

3.4. Direction. — Il peut arriver, mais c'est extrêmement rare, qu'une rupture se produise en un point quelconque de la timonerie de la direction. La pièce qui fatigue le plus est le levier de direction ou bielle pendante, qui transmet l'effort du boîtier de direction à la bielle de direction. Cette pièce est particulièrement soignée et faite en acier « incassable » qui plie sous un choc violent mais ne rompt pas. En revanche, très souvent, la direction peut présenter des défauts qui rendent la conduite plus délicate, voire désagréable et parfois même dangereuse.

Voici, très sommairement, quelques-uns de ces défauts et leurs causes principales :

3.4.1. La voiture « tire » à droite ou à gauche. — Cela peut provenir des points suivants :

— *pneumatiques :* gonflage inégal des pneumatiques de l'essieu avant ;

— *géométrie de l'essieu avant :* défaut de parallélisme des roues : pinçage ou carrossage inégal ; angles de chasse ou d'inclinaison de pivot mauvais ;

— *suspension :* ressort d'un côté affaissé, ou mal monté, triangle de suspension de voiture à roues avant indépendantes faussé ;

— *timonerie de direction :* barre d'accouplement ou levier de commande légèrement faussés ou timonerie mal centrée ;

— *freins :* un des freins frotte légèrement dans son tambour.

3.4.2. Réactions désagréables dans le volant. — En principe les directions sont étudiées de façon à être irréversibles, c'est-à-dire que le volant de direction peut faire tourner les roues mais que les chocs des roues sur les inégalités de la route ne doivent pas faire tourner le volant entre les mains du conducteur. Les réactions dues au sol sont amorties par le pneu, la timonerie avec ses articulations à ressorts amortisseurs, le boîtier de direction et grâce à un réglage convenable de la géométrie du train avant. Lorsque le conducteur perçoit des réactions sèches et désagréables il faut vérifier :

— les organes de la direction qui peuvent présenter des jeux ou des usures exagérés ;

— la géométrie du train avant qui peut être défectueuse ;

— si le type, la dimension et le gonflage des pneus sont bien ceux indiqués par le constructeur.

3.4.3. Mauvaise « tenue de route ». — Certaines voitures ont, dès leur naissance, une « tenue de route » qui laisse à désirer. C'est un vice congénital qui tient à la conception même du véhicule. Nous ne mentionnerons ici que la mauvaise tenue de route qui apparaît sur une voiture en utilisation. Les causes peuvent être les suivantes :

— *direction :* jeux anormaux dans la timonerie et le boîtier, direction trop dure ;

— *géométrie du train avant :* insuffisance de carrossage sur une roue ou sur les deux roues, mauvais angle de chasse, insuffisance de pinçage, essieu avant déplacé ou légèrement cintré ;

— *suspension :* affaissée, jeu dans les attaches avec l'essieu, jeu dans les triangles de suspension ;

— *défaut de parallélisme des essieux avant et arrière.*

3.4.4. Flottement des roues avant et shimmy. — En dehors des causes directement liées à la direction ou à la suspension, il y a lieu d'examiner :

— *les roues :* jante pliée à la suite d'un choc, fusée faussée, mauvais équilibrage (balourd) ;

— *les pneumatiques :* mauvais montage, inégalité d'usure des bandes de roulement, pression de gonflage insuffisante ou inégale entre les deux roues.

D'une façon générale, une usure anormale et surtout une usure inégale des pneus avant, doit attirer l'attention de l'usager sur les organes de direction et il doit immédiatement en faire rechercher les causes et y porter remède.

3.5. Freins. — Un excellent freinage est primordial pour la sécurité. Il est dangereux et parfois criminel pour soi-même et pour les tiers de circuler avec des freins en mauvais état. Il faut donc procéder périodiquement à l'entretien et au réglage des freins.

En dehors d'une rupture brutale de commande de frein (avarie d'une canalisation d'huile ou d'air, bris d'un câble) qui est heureusement extrêmement rare, les défauts les plus courants sont les suivants :

1° *Course excessive de la pédale de freinage hydraulique :* légère fuite dans une canalisation ou purge d'air mal faite.

2° *Huile ou eau dans les freins :* l'eau pénètre dans les freins souvent au lavage de la voiture (jet puissant et

mal dirigé). Dans les freins avant l'huile peut provenir d'un graissage trop abondant des fusées et dans les freins arrière d'un excès d'huile dans le pont: une garniture noyée par l'huile doit être changée.

3° *Freins qui « grincent » ou qui « broutent »:* le grincement est souvent dû au fait que le tambour insuffisamment rigide se met à vibrer. C'est souvent un défaut d'origine, tandis que le broutement est dû au manque d'entretien: garniture usée, ovalisation des tambours, fixation insuffisante des garnitures qui se séparent du sabot.

4° *Freins qui « chauffent »:* ce défaut provient d'un mauvais réglage et les garnitures continuent à frotter légèrement sur les tambours, même quand les freins sont desserrés.

5° *Freins qui engagent brutalement:* cet incident survient parfois après une immobilisation prolongée du véhicule dans un lieu humide. La surface des tambours se recouvre d'une petite couche de rouille. Au moment du serrage la garniture colle. Le défaut disparaît après quelques coups de frein répétés.

6° *Freins déséquilibrés par défaut de réglage:* les freins de la roue droite et de la roue gauche du même essieu ont des efficacités nettement différentes.

3.6. Suspension. — La seule panne importante qui puisse arriver est la rupture d'un ressort: rupture d'une lame d'un ressort à lames, rupture d'une spire d'un ressort hélicoïdal, rupture d'une barre de torsion. Il ne faut pas rouler avec un ressort cassé; si cela est possible on fait une réparation de fortune pour rentrer au garage à petite allure, et on fait remonter la pièce de rechange.

Les suspensions des roues indépendantes sont toujours prévues de façon que la rupture d'un ressort n'entraîne pas un affaissement total. Comme le ressort hélicoïdal casse souvent près de la spire d'appui, la marche à petite allure n'entraîne pas de difficultés. Il faut cependant s'assurer que l'incident ne comporte pas de risques pour la canalisation d'huile du frein (usure par frottement en particulier).

3.7. Pannes d'électricité. — La voiture automobile est devenue maintenant une véritable centrale électrique. Les pannes peuvent être multiples, toujours ennuyeuses, parfois dangereuses (extinction brutale de l'éclairage). Elles sont souvent difficiles à réparer sur la route. Il est donc prudent de vérifier et d'entretenir périodiquement l'installation électrique du véhicule.

Les pannes d'électricité automobile peuvent être réparties en quatre grandes catégories:

— pannes de charge;
— pannes de démarrage;
— pannes d'allumage;
— pannes d'éclairage.

3.7.1. Pannes de charge. — L'instrument qui contrôle la charge est l'ampèremètre ou l'indicateur qui en tient lieu. Il faut donc qu'il soit en bon état et que ses indications soient exactes. On le vérifie en créant volontairement une décharge, en allumant les projecteurs de route, par exemple. L'ampèremètre doit revenir au zéro si l'on coupe le circuit de décharge et passer au secteur charge dès que le moteur tourne à assez vive allure.

Sur la voiture la batterie est chargée par la dynamo ou l'alternateur entraîné par le moteur. Si l'on constate au moyen de l'ampèremètre que la batterie ne se charge pas quand le moteur tourne normalement, il faut d'abord vérifier l'entraînement de la dynamo.

On vérifie ensuite si la dynamo produit de l'électricité en détachant le fil entre dynamo et conjoncteur-disjoncteur ou entre dynamo et régulateur et en l'approchant de la masse. Des étincelles doivent jaillir, sinon la dynamo est défectueuse (fils coupés, balais en mauvais état). On vérifie de même si le courant passe à travers le conjoncteur et s'il arrive à la batterie.

3.7.2. Pannes de démarrage. — La batterie peut être déchargée. On vérifie ce point en allumant les projecteurs: si les filaments sont rouges et non blancs éblouissants, la batterie est insuffisamment chargée.

En dehors d'une avarie mécanique du démarreur, les causes de pannes électriques peuvent être les suivantes:

— *contacteur défectueux:* le courant ne s'établit pas;
— *circuit batterie-contacteur-démarreur-masse coupé en un point:* on vérifie section par section avec une lampe témoin;
— *partie électrique du démarreur en mauvais état:* fils rompus dans le bobinage, isolement claqué, lames de collecteur brûlées, balais usés, collecteur charbonné ou huileux.

3.7.3. Pannes d'allumage. — On admet que batterie et bougies ont été vérifiées et sont en bon état et que le contact est mis. Il faut alors procéder comme dans tous les cas de pannes électriques et vérifier méthodiquement section de circuit par section de circuit, de façon à localiser la cause. Elle peut provenir d'une rupture de circuit (fil, connexion, fusible), d'une avarie au rupteur (contact, ressort cassé, isolement) ou à la bobine (isolement intérieur claqué) ou au distributeur. Une bonne précaution consiste à avoir deux bobines montées côte à côte, de façon à pouvoir passer facilement de l'une à l'autre.

3.7.4. Pannes d'éclairage. — Le nombre de lampes qui se trouvent utilisées à bord d'une automobile devient considérable: feux de route, feux de croisement, lanternes, feux de position, feux arrière, stop, éclairage de plaque d'immatriculation, tableau de bord, plafonnier, ouverture de porte, etc.

Si une lampe ne fonctionne pas, elle peut être détériorée, mal enfoncée ou mal vissée (trépidations) ou le circuit est coupé (fil, contact, fusible). Afin de ne pas être en contravention il est devenu réglementaire, de toujours avoir à bord du véhicule un jeu des lampes intéressant la sécurité (projecteur, feu arrière, feu stop, feu d'éclairage de plaque).

CHAPITRE XXIX

LE GARAGE; LES STATIONS-SERVICE; LES STATIONS-CONTRÔLE DE SÉCURITÉ

1. LE GARAGE PARTICULIER

Dans les zones résidentielles près des grandes villes, dans les petites villes, à la campagne, l'usager fait souvent construire un garage dans sa propriété.

Le Bureau des normes de l'automobile a établi en accord avec la Société des ingénieurs de l'automobile une norme (fig. XXIX-1) accompagnée des commentaires suivants:

— Les dimensions indiquées dans le tableau sont des minimums.

— Il est recommandé de prévoir des portes (coulissantes, horizontales ou verticales, à panneaux dépliants ou rabattables) dont la largeur se rapproche de celle du garage.

— Toutes les fois que la construction le permettra, il faut prévoir une petite porte donnant accès direct dans la maison et une fenêtre.

— Si la disposition d'un système de chauffage central le permet, installer un radiateur.

— Il est généralement préférable que l'usager entreprenne le moins possible de travaux importants sur sa

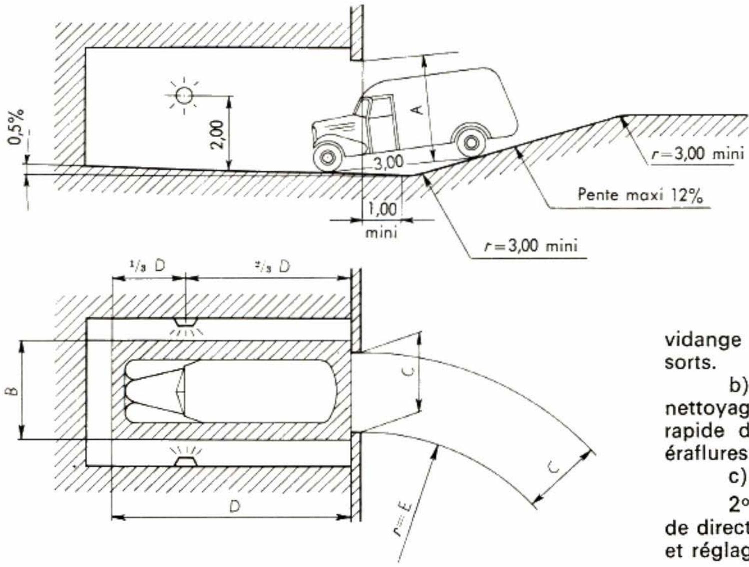


Fig. XXIX-1

Dimensions de garages et passages de véhicules (garages particuliers)

Type de véhicule	A	B	C	D	E
Voiture particulière 12 ch environ	2,00	3,20	2,80	5,50	4,30
Véhicule utilitaire (charge utile 1,5t maximale)	3,00	3,60	3,00	6,50	5,80

voiture, à moins qu'il ne soit un ouvrier qualifié. La fosse n'est donc pas à recommander.

— L'éclairage est assuré par deux lampes disposées latéralement en applique au tiers de la largeur.

— Prévoir l'emplacement d'un extincteur d'incendie, d'une prise de courant, d'un petit établi et d'un robinet d'eau à l'intérieur du garage (précaution contre le gel).

— Le sol du garage doit avoir une pente de 0,5% environ pour assurer l'écoulement des eaux de lavage. Une cuve de décantation doit être prévue si les eaux chargées d'huile vont à un puisard.

2. L'ENTRETIEN DES VOITURES

L'usager n'a généralement pas les moyens matériels de vérifier les organes de son véhicule, de le graisser, le laver, le réparer.

Ces opérations sont faites dans des établissements, appelés communément « garages » tenus par un « garagiste » ou « motoriste ».

Un garage comporte tout ou partie des services suivants :

— garage proprement dit ou « garage-hôtel » ;
— station-service ;
— vente de carburants et lubrifiants ;
— atelier de réparations ;
— magasin de pièces détachées, d'équipements, de pneumatiques ;
— vente de véhicules neufs et d'occasion.

L'importance des garages-hôtels varie avec l'importance des villes, de la station thermale ou balnéaire et parfois du trafic sur une route nationale. Cette dernière remarque est également applicables aux stations-service qui sont de plus en plus nombreuses.

Le motoriste utilise un personnel qui peut être de quelques unités pour les petites entreprises et atteindre deux cents à trois cents ouvriers et employés dans les grandes succursales régionales des firmes d'automobiles.

2.1. La station-service. — Pour satisfaire rapidement une clientèle toujours plus nombreuse, on a créé et multiplié ce que l'on appelle les « stations-service ». C'est un emplacement où des techniciens qualifiés pour l'entretien des véhicules ont à leur disposition un matériel moderne spécialisé permettant d'assurer efficacement et très rapidement les services d'entretien, de sécurité, de diagnostics et de contrôle. La station-service ne fait pas le garage-hôtel, ni les grosses réparations. Elle se borne à l'entretien courant.

Les services attendus de la station sont les suivants :

1° *Entretien :*

a) *Graissage et entretien du châssis :* graissage général du châssis ; remplissage des boîtes de vitesses et ponts ; vidange et remplissage des moteurs ; graissage des ressorts.

b) *Entretien de la carrosserie ;* lavage, lustrage ; nettoyage de l'intérieur de la voiture ; replanage et retouche rapide de la peinture des ailes, élimination des petites éraflures.

c) *Réparation des pneumatiques, adhérisation.*

2° *Sécurité.* — Vérification et réglage des organes de direction ; vérification et réglage des freins ; vérification et réglage des projecteurs.

3° *Diagnostics.* — Diagnostic allumage (bobines, bougies, condensateurs, allumeurs) ; diagnostic dynamo, batterie, démarreur ; diagnostic carburation (carburateur, pompes) ; diagnostic compression-dépression.

4° *Services courants.* — Distribution de carburant et d'huiles, gonflage, contrôle de pression, vérification radiateur, etc.

Les stations-service sont créées soit par de grands garages, car non seulement le service lui-même est une source de profit mais tous les automobilistes qui y viennent régulièrement sont de futurs clients pour le service réparations, soit par des firmes pétrolières qui ont là un point de vente pour leurs produits. Certaines de ces stations sont aménagées et équipées luxueusement.

2.2. La station-self-service. — Aux États-Unis d'Amérique et principalement en Californie, moyennant le paiement d'une location horaire, la station met à la disposition du client un emplacement, l'outillage nécessaire et les conseils d'un technicien de façon à lui permettre d'exécuter lui-même vérifications, entretien, petites réparations, réglages, etc. Le prix de revient pour l'usager est proche de 35 % du prix normal dans un garage.

2.3. Échange standard. — Toutes les grandes firmes automobiles pratiquent aujourd'hui ce que l'on appelle « l'échange standard », c'est-à-dire qu'un automobiliste dont la voiture présente un ensemble usé (moteur, boîte de vitesses, pont arrière, embrayage, etc.), peut le faire remplacer par un autre ensemble identique révisé et garanti par le constructeur. L'ensemble déposé sera lui-même révisé et remis à neuf pour un autre échange.

Cette façon d'opérer permet de gagner un temps appréciable, elle offre la garantie du constructeur et elle est finalement moins onéreuse que la réparation directe.

3. LA STATION-CONTRÔLE DE SÉCURITÉ

L'augmentation du nombre des voitures, l'accroissement des vitesses et des tonnages multiplient les risques d'accidents. Les pertes en vies humaines par accidents de circulation atteignent un tel niveau que dans tous les pays on cherche à limiter ce fléau. En France c'est l'O.N.S.E.R. (Office national de sécurité routière) qui est chargé de procéder à des études systématiques sur ce sujet et dont les conclusions doivent permettre l'élaboration de propositions concrètes au gouvernement pour tout au moins tenter de réduire ce gaspillage humain sans compter les pertes affectives, économiques et matérielles qu'il entraîne. Dans un accident de circulation il y a toujours en présence trois éléments : le conducteur, la voiture, l'environnement ; il est important de rechercher le rôle de chaque élément pour trouver la cause de l'accident. L'étude de nombreux cas permet de déterminer les causes les plus fréquentes et par

suite indique la direction des recherches d'un remède. Les procès-verbaux d'accident sont dressés avec objectivité par la police qui met nécessairement l'accent sur la recherche des violations éventuelles de la loi dans le but d'établir les responsabilités pénales et civiles. En conséquence, toutes les études faites à partir de ces procès-verbaux conduisent à minimiser la part de la voiture et celle de l'environnement et à augmenter celle du conducteur. On peut regretter cet état de choses mais il serait injuste d'en faire grief à la police qui n'a ni le temps ni la possibilité de procéder à toutes les investigations nécessaires pour trouver le pourquoi de la violation apparente de la loi et qui conduiraient souvent à des enquêtes aussi longues et difficiles que celles qui sont effectuées après un meurtre. Aussi l'O.N.S.E.R., comme les commissions analogues à l'étranger, étudie-t-il dans le détail quelques accidents choisis comme étant représentatifs. Cette étude est confiée simultanément à des commissions diverses comportant des ingénieurs de la circulation et de techniques automobiles, des médecins de diverses spécialités, des psychiatres, des psychologues et même, aux États-Unis d'Amérique, des pasteurs. La conclusion générale des différents travaux effectués aussi bien en France qu'à l'étranger est qu'un accident est le plus souvent la conséquence d'un faisceau de circonstances impliquant soit l'homme, soit la voiture, soit l'environnement, soit plusieurs de ces facteurs simultanément ; un des éléments du faisceau est la cause principale (souvent différente de la cause apparente telle qu'elle résulte du procès-verbal de la police) ; les autres sont des causes secondaires qui aggravent les conséquences de l'accident. Toutes les commissions sont d'accord sur la présence très fréquente (dans environ 80 % des cas) d'une cause humaine, au moins à titre secondaire, mais les divergences sont très importantes quand il s'agit de fixer le pourcentage d'accidents comportant une cause technique. Si le pourcentage est voisin de 4,5 % d'après les statistiques des polices, il varie entre 12 % et 33 % selon les commissions des différents pays (1). Il faut bien insister sur le fait qu'il n'y a pratiquement plus d'accidents causés par la rupture d'une pièce mal conçue ou mal fabriquée. En revanche, l'usure, les déréglages ou les accidents antérieurs inconnus ou n'ayant pas donné lieu à des remises en état convenables sont fréquemment incriminés. Les points défectueux les plus fréquents sont en proportion à peu près égale : les pneus, les freins, l'éclairage, la signalisation et aussi le train avant (direction et géométrie). De là à penser qu'un contrôle systématique de l'état des véhicules au point de vue sécurité serait bénéfique, il n'y a qu'un pas à faire et qui l'a été effectivement. En France, ce contrôle est obligatoire pour les poids lourds et pour les taxis, dans de nombreux pays ce contrôle s'étend à une partie plus ou moins importante du parc allant même jusqu'à la totalité. En complément, existent également sous l'impulsion des clubs automobiles, des organisations exécutant des contrôles volontaires.

En France, la Fédération nationale des clubs automobiles et ses clubs associés ont créé un réseau de cent trente-cinq centres fixes ou mobiles, répartis dans tout le pays et qui sont à la disposition de tous les automobilistes, qu'ils soient ou non membres d'un club. L'expérience recueillie tant en France qu'à l'étranger a prouvé que dans le cas d'un parc automobile non soumis à un contrôle systématique, environ deux sur trois des véhicules ne sont pas en parfait état de sécurité ; un contrôle annuel décèle encore un véhicule sur trois présentant des déficiences et dont une petite moitié doit être remise en état sans délai à peine d'une conduite dangereuse. Aux États-Unis d'Amérique, une commission a poussé l'étude au moyen d'échantillons de voitures pris dans trois États et a trouvé qu'avec deux visites annuelles l'amélioration du parc est peu sensible par rapport aux résultats donnés par une seule visite annuelle. Il faut arriver à trois visites par an pour qu'on ne trouve plus que 12 % de voitures présentant une ou plusieurs déficiences. Il va sans dire qu'imposer à chaque automobiliste trois visites par an est une sujétion insupportable et une charge inadmissible si l'on pense que la visite revient actuellement au moins à 50 F, frais d'amortissement compris.

Le personnel qualifié du centre de sécurité procède à la vérification des pneus, du train avant (direction, suspension, géométrie), des dispositifs d'éclairage et de signalisation (en particulier réglage des projecteurs) et des freins. Il remet une fiche donnant le résultat de son examen à l'usager qui a ensuite le devoir de faire procéder aux réparations et remises en état qui s'imposent par le garagiste de son choix à moins qu'il le fasse lui-même. Il lui est loisible de retourner au centre une fois que les réparations sont faites, de façon à s'assurer qu'elles ont été correctement exécutées.

Les appareils principaux d'un centre de sécurité sont :

— une table de ripage qui indique si les roues sont bien placées lors d'une marche en ligne droite et deux plateaux pivotants gradués pour effectuer la même vérification dans le cas d'un virage ;

— un banc de freinage dans les centres fixes, ce qui permet de mesurer l'effort de freinage de chacune des roues, la somme des quatre efforts partiels donnant l'effort total de freinage. Dans les centres mobiles, le banc de freinage est remplacé par un décéléromètre donnant par lecture directe la décélération que les freins peuvent appliquer à la voiture ;

— l'appareil de vérification du réglage des projecteurs. Il permet, d'une part, soit un contrôle rapide de la hauteur de la coupure du faisceau « code », soit une mise au point de la direction des faisceaux « route » et « code » et, d'autre part, de s'assurer de la qualité de l'éclairage.

Les appareils utilisés en France sont le « régloscope Cibié » ou le « réglolux Marchal ».

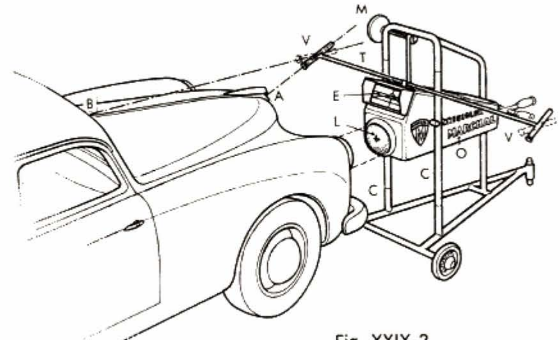


Fig. XXIX-2

Réglage des projecteurs d'automobiles

La figure XXIX-2 montre l'utilisation du « réglolux Marchal ». L'appareil se compose essentiellement d'un bloc optique *O*, étanche, comportant une grosse lentille *L* qui donne l'image du faisceau lumineux des projecteurs sur un miroir. À son tour, celui-ci réfléchit l'image sur un écran *E* portant des lignes de repère et placé au-dessus du bloc.

L'ensemble du bloc optique, commandé par un volant de manœuvre avec frein *M*, se déplace verticalement sur les deux montants *C* du châssis-support, ce qui permet de placer le bloc optique *O* face au projecteur à régler. De plus, au-dessus du bloc et se déplaçant avec lui, deux viseurs *V* montés sur un tube transversal permettent, par des visées sur *A* et *B*, d'assurer la mise en ligne parfaite de l'axe longitudinal de l'appareil parallèlement à celui de la voiture pour le réglage en direction des faisceaux.

Ce sont la forme et la position de l'image du faisceau par rapport aux repères sur l'écran qui indiquent si le réglage des projecteurs est bon et si la qualité de l'éclairage est satisfaisante. L'image du filament « route » doit se trouver dans le petit cercle du verre dépoli, et la coupure du faisceau « code » dans la partie inférieure.

La Fédération nationale des clubs automobiles a également créé des centres de sécurité pour deux-roues à moteur, mais leur activité reste très limitée.

(1) Cette valeur 33 % est donnée par une commission britannique ayant étudié un échantillon de deux cent cinquante accidents survenus dans Birmingham, et dont l'enquête a pu commencer moins de 15 mn après qu'ils se soient produits. Il est curieux de remarquer que dans ces 33 % sont inclus 4,8 % d'accidents pour lesquels la cause technique est soit principale soit unique ; on retrouve donc les valeurs données par la police.

CHAPITRE XXX

LES MOTOCYCLES

1. GÉNÉRALITÉS

1.1. Historique. — L'histoire des motocyles débuta lorsque, fatigués de pédaler sur leur vélocipède, certains mécaniciens ingénieux s'adjoignirent l'aide d'un moteur. L'idée de la moto, née en France dans l'esprit d'un caricaturiste parisien, vit sa première réalisation aux environs de 1869, lorsque Michaux et Perreaux construisirent le premier vélocipède à vapeur.

Le moteur, un monocylindre, fut l'œuvre de Perreaux; Michaux fit le reste. À cette époque l'engin ne se nommait pas « motocyclette ». Cette appellation désigna l'œuvre des frères Werner, des français d'origine russe qui, en 1897, furent les premiers à commercialiser des « motocyclettes » somme toutes assez proches de nos machines actuelles. Entre le vélocipède à vapeur et la première motocyclette il apparut de bien curieux engins : un vélocipède mû par un moteur à ressort, un bicycle Millet dont le moteur (un cinq cylindres en étoile) prenait place dans la roue arrière et surtout la fameuse machine de Daimler qui, en 1885, fut le premier engin à moteur quatre temps. La machine de Daimler ressemblait à un vélo d'enfant muni de roulettes stabilisatrices. En 1887 l'Anglais Butler construisit le premier tricycle à moteur deux temps. Il est curieux de noter que ce type de moteur ne se développa vraiment que dans notre dernière décennie.

1.2. Classification. — Les réglementations administratives classent les motocycles en trois grandes catégories.

1.2.1. Cyclomoteurs. — Ce sont les plus petits; ils remplissent les trois conditions suivantes: cylindrée du moteur n'excédant pas 50 cm^3; vitesse maximale 45 km/h; pédales obligatoires pour la propulsion éventuelle. En France, il n'est pas besoin de posséder un permis pour le conduire, il suffit d'avoir au moins quatorze ans d'âge (fig. XXX-1).

1.2.2. Vélomoteurs. — Ce sont de petites motos dont le moteur a une cylindrée inférieure à 125 cm^3 et qui ne satisfont pas aux conditions permettant de les classer comme cyclomoteurs. Pour les conduire il faut avoir une licence A 1 et être âgé au moins de seize ans. Le permis de conduire une automobile donne automatiquement droit à la licence A1.

1.2.3. Motocyclettes. — On appelle ainsi tout motocycle dont la cylindrée est supérieure à 125 cm^3. Pour piloter une moto il faut le permis A. Ce permis peut s'obtenir à l'âge de dix-huit ans et porte sur deux épreuves : conduite et code (V. fig. XXX-2).

1.2.4. Scooters. — Les scooters sont classés parmi les vélomoteurs ou les motocyclettes suivant leur cylindrée. Le



Fig. XXX-1

Cyclomoteur « utilitaire » avec suspension avant et arrière (*Motobécane*)

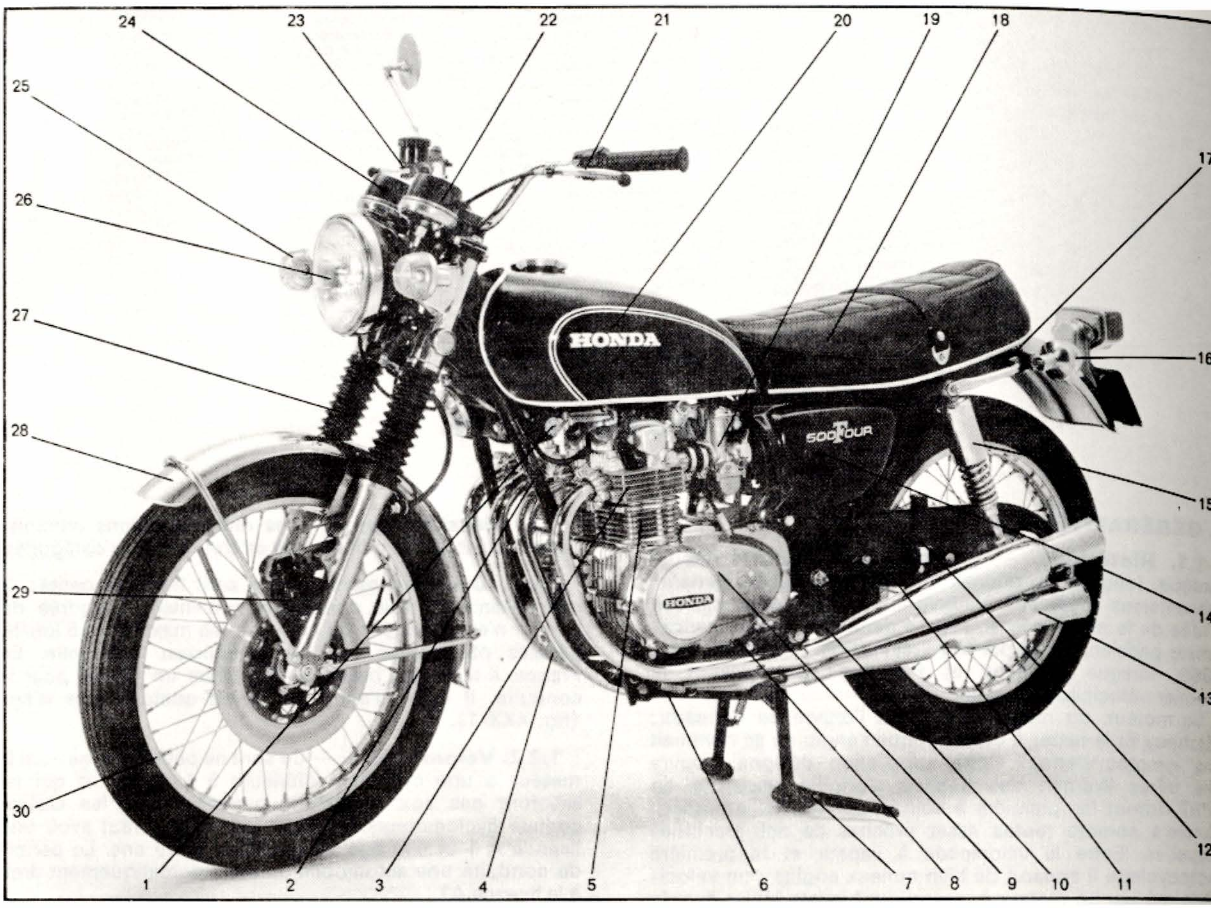


Fig. XXX-2 — Motocyclette (*Honda*)

1. Contacteur général ; clé de contact. — 2. Cadre double berceau. — 3. Culasse. — 4. Filtre à huile. — 5. Cylindre. — 6. Béquille latérale — 7. Béquille centrale — 8. Sélecteur de vitesses. — 9. Carter moteur. — 10. Repose-pieds du pilote. — 11. Bras oscillant. — 12. Repose-pieds du passager — 13. Silencieux. — 14. Protège-filtre à air. — 15. Amortisseur arrière réglable. — 16. Clignotant arrière. — 17. Poignée de tirage pour béquilles. — 18. Selle double amovible. — 19. Carburateur. — 20. Réservoir. — 21. Levier embrayage. — 22. Compteur kilométrique. — 23. Levier de frein avec réservoir de fluide pour frein à disque. — 24. Compte-tours. — 25. Clignotant avant. — 26. Bloc optique. — 27. Fourche télescopique hydraulique. — 28. Garde-boue avant chromé. — 29. Freins à disque. — 30. Jante acier

scooter se caractérise par un cadre ouvert, des petites roues et de nombreux carénages protecteurs. Ce type de motocycle, très en vogue vers 1950, est en voie de disparition.

1.2.5. Side-car. — À vrai dire le side-car est une plate-forme plus ou moins équipée fixée sur le côté d'une moto et munie d'une roue, éventuellement motrice. Mais généralement on désigne par side-car l'ensemble moto et side-car. Cet attelage est de moins en moins utilisé.

1.2.6. Divers. — Comme autre véhicule à trois roues dépendant de l'industrie et des réglementations des motocycles signalons les motos-tris, communément appelées triporteurs, qui peuvent aussi entrer dans la catégorie des vélomoteurs si la cylindrée de leur moteur n'excède pas 125 cm³. De même on peut signaler les motocyclettes carrossées (monotrace de 1928) et les motocyclettes à chenilles tombées dans l'oubli.

1.2.7. Puissance administrative. — La puissance administrative des motocycles est évaluée suivant la cylindrée totale du moteur. Si elle est :

— inférieure ou égale à 125 cm³ : 1 CV ;
— comprise entre 125 et 175 cm³ : 2 CV ;
— comprise entre 175 et 250 cm³ : 3 CV ;
— comprise entre 250 et 350 cm³ : 4 CV ;
— comprise entre 350 et 500 cm³ : 5 CV.

Au-delà de 500 cm³ on compte 1 cheval par 125 cm³ ou fraction de 125 cm³ supplémentaires.

1.3. Production. — La production nationale est essentiellement axée sur le cyclomoteur. En 1973 la France a produit 1 216 196 cyclomoteurs dont environ la moitié est exportée ; elle se place en tête du marché mondial de ce type de machine. Toujours en France, la production des vélomoteurs est encore modeste tandis que celle des motocyclettes est très faible. Dans ces deux dernières catégories les importations sont importantes : 55 759 en 1972 dont 44 467 en provenance du Japon. Les importations ont un taux de progression de l'ordre de 65 %. Parc national en 1972 ; cyclomoteurs, vélomoteurs et motocyclettes : 415 000.

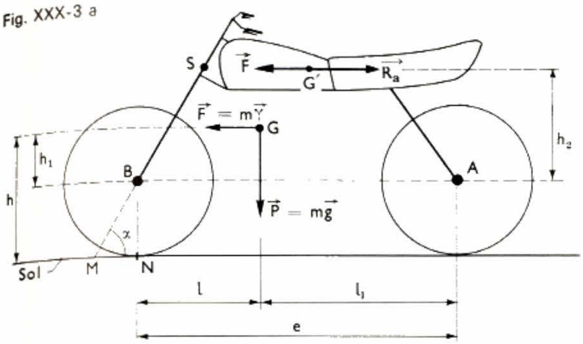
2. ÉQUILIBRE D'UN MOTOCYCLE

Sans qu'il soit nécessaire d'insister, chacun a constaté que l'équilibre d'un deux roues est instable à l'arrêt, mais est stable en marche normale : c'est l'effet gyroscopique des roues qui procure une véritable stabilité transversale d'autant meilleure que la vitesse est plus grande et la grosseur des pneus plus importante (par suite de cet effet, tout corps tournant autour d'un de ces axes de symétrie a tendance à conserver sa position initiale et à revenir à cette position si on l'en écarte).

Toutefois l'emplacement du centre de gravité de l'ensemble machine-conducteur, celui du centre de poussée ainsi que la valeur de l'empattement et celle de la chasse influent sur la stabilité et méritent quelques développements.

2.1. Emplacement du centre de gravité. — *La verticale du centre de gravité G doit être suffisamment en*

Fig. XXX-3 a



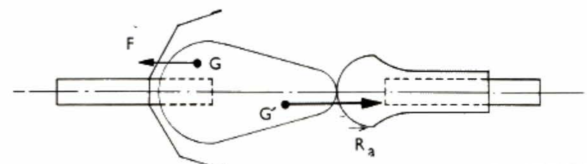


Fig. XXX-3 b

Fig. XXX-3 — Différentes forces s'exerçant sur la moto (conducteur non représenté) durant une accélération. G et G' sont respectivement le centre de gravité et le centre de poussée de l'ensemble moto-conducteur (dont la masse est $m = \frac{P}{g}$)

avant de celle passant par le centre du moyeu de la roue arrière A, s'il n'en est pas ainsi (fig. XXX-3 a) le couple de cabrage au démarrage ou sous l'action d'une accélération brutale n'est plus compensé par le moment du poids $\vec{P}$ de l'ensemble pris par rapport à *A*. La roue avant tend à se soulever; le démarrage n'est pas franc quand il se produit et la direction n'est plus parfaitement assurée. D'où, pratiquement cela impose :

- de charger de préférence le porte-bagages avant et non celui de l'arrière.
- en course, de se pencher fortement en avant quand on accélère à fond et cela beaucoup plus pour conserver une direction sûre que pour réduire le maître-couple et par suite la résistance de l'air.

— *La verticale de G ne doit tout de même pas trop se rapprocher de celle passant par le centre du moyeu de la roue avant B* : effectivement au freinage la machine à tendance à pivoter autour de *B*, surtout si la rotation de la roue est fortement entravée et *a fortiori* arrêtée. Ce pivotement ne peut être évité que si le moment du poids $\vec{P}$ pris par rapport à *B* est supérieur au moment de la force d'inertie $\frac{\gamma P}{g}$ pris par rapport à *B* (γ décélération, *g* accélération de la pesanteur). Comme γ est inférieur ou égal à *g*, cette condition est remplie si la distance *l* de la verticale de *G* à *B* est supérieure à la hauteur h_1 de *G* au-dessus de *B*. Cette nécessité impose de ne pas mettre sur le porte-bagages avant un chargement élevant par trop le centre de gravité.

Toutes ces considérations expliquent pourquoi charger le porte-bagages d'une motocyclette ne peut être fait de façon quelconque. Il semblerait qu'il soit avantageux de s'arranger pour que le centre de gravité soit aussi bas que possible ; toutefois, il ne faut pas oublier que plus ce point est bas, plus est faible sa déviation latérale (sous l'influence de l'inertie centrifuge, lors d'un virage, ou de celle des mouvements du conducteur), déviation nécessaire pour éviter une chute par rupture d'équilibre latéral. Il y a donc un compromis à trouver.

Le calcul effectué dans le cas simple théorique d'une machine animée d'un mouvement circulaire à vitesse faible et uniforme, pour négliger les effets gyroscopiques, montre que la déviation maximale possible *x* est donnée par la formule : $x = \frac{V^2}{g\,R}\,h$, dans laquelle *V* est la vitesse, *R* le rayon du virage et *h* la hauteur de *G* par rapport au sol ; ce résultat explique pourquoi les acrobates qui s'exhibent sur des machines extrêmement basses prennent soin de dissimuler dans leur coiffure une calotte de plomb : la hauteur du centre de gravité de l'ensemble conducteur-moto est ainsi fortement augmentée.

— *Le centre de gravité doit être en avant du centre de poussée*. Le centre de poussée *G'* (ou métacentre) est le point d'application de la force R_a due à la résistance de l'air. L'emplacement de ce point ne dépend que du volume et de la forme extérieure de l'ensemble conducteur-moto ; en général *G'* n'est pas confondu avec le centre de gravité *G* de ce même ensemble.

La force propulsive $\vec{F}$ appliquée en G et R_a forment un couple. Si le centre de gravité se trouve en avant du centre de poussée (fig. XXX-3 b), ce couple est stabilisateur. S'il n'en est pas ainsi, lorsqu'on freine et que la décélération est assez grande, le couple formé, par la force d'inertie et la résistance de l'air conduit nécessairement à faire un tête-à-queue comme l'expérience ne le montre que trop souvent. On trouve là une raison supplémentaire pour ne pas surcharger le porte-bagages arrière.

2.2. Valeur de l'empattement. — *On démontre que l'empattement doit être au moins égal à deux fois la hauteur du centre de gravité au-dessus de celle des moyeux des roues*

$$e \geqslant h_1$$

2.3. Valeur de la chasse. — *Elle doit être positive* (V. fig. XXX-3 a). La direction est caractérisée par l'angle α fait avec le sol par l'axe de pivot de la direction *SM* et par la distance *MN* appelée *chasse*. Elle est positive si *M* est en avant de *N*, négative dans le cas contraire. Le rôle de la chasse des motos est le même que celui de la chasse des voitures mais il faut remarquer que ces dernières ayant deux roues directrices, si les deux roues prennent en même temps, et d'une façon intempestive, un mouvement de fermeture ou d'ouverture, les deux effets s'annulent sans que la direction soit affectée. Avec une motocyclette, il n'en est pas de même : un mouvement de braquage intempestif fait quitter la trajectoire désirée. C'est pourquoi, alors que sur un véhicule il est parfois possible d'accepter une chasse négative, avec une motocyclette cela n'est pas possible, sinon, au freinage, le moment de la réaction du sol appliquée en *N* et dirigée vers l'arrière, moment pris par rapport à *M* situé en arrière de *N*, entraîne presque obligatoirement un braquage intempestif et la culbute du motocycliste, avec tête-à-queue. Cette impérieuse nécessité montre qu'il n'est pas possible de concevoir une motocyclette à traction avant : pour que la direction soit stable, il faudrait que la chasse soit négative en traction puisque la réaction du sol est alors dirigée vers l'arrière ; au freinage il y aurait nécessairement chute. La traction avant n'est à la rigueur possible que sur de petites machines peu puissantes comme le vélosolex, dont la chasse est pratiquement nulle mais on sait qu'avec cette machine il est difficile de lâcher le guidon, et qu'au démarrage, en pédalant sans le secours du moteur, il n'est pas aisé d'avancer sans faire des sinuosités sur la route.

2.4. Cas particulier : le side-car. — Nous nous contenterons de faire remarquer que c'est un véhicule dissymétrique, même si la roue du panier est motrice, et qu'il doit être conduit le corps restant droit même dans les virages. Effectivement, si voulant tourner à droite, par exemple, on se penche à droite, on exerce une traction sur le guidon qui fait braquer la route à gauche ; si l'on insiste on va au fossé.

En outre nous ajouterons que le panier doit être fixé du côté ou le code prévoit la circulation, c'est-à-dire à droite en France et dans la majorité des pays étrangers, à gauche en Grande-Bretagne, car force d'inertie centrifuge et poids donnent une résultante qui sort facilement du polygone de sustentation quand on tourne du côté du panier, surtout si la route est bombée. Cette particularité

explique pourquoi, quand on roule vite, le passager du panier doit, pour améliorer la stabilité en virage, se pencher du côté opposé à la moto quand on tourne du côté du panier ; cela le conduit à prendre des positions acrobatiques en course.

3. LE MOTEUR À DEUX TEMPS

Bien que certains motocycles soient équipés de moteurs à quatre temps, comparables à ceux de l'automobile, c'est le moteur à deux temps refroidi par l'air type « lumières » qui est le plus répandu sur les deux roues. Par ailleurs on peut signaler que des moteurs à piston rotatif ont fait leur apparition (Yamaha, Suzuki).

3.1. Principe général. — Il est rappelé que les quatre phases : admission, compression, production de chaleur et détente, échappement, qui sont réparties sur deux tours du vilebrequin dans un quatre temps (deux allers et deux retours du piston) se succèdent dans un deux temps sur un seul tour du vilebrequin (un aller et un retour du piston). Cela est possible parce que les phases échappement et admission ont lieu très rapidement et sensiblement au moment où le piston se trouve au point mort bas (P.M.B.). A cet effet, il existe une phase supplémentaire qui se passe en dehors du cylindre : la « précompression », compression préalable du mélange d'air carburé pour aider son admission dans le cylindre, opération qui est réalisée au moyen d'une pompe ou d'un compresseur.

Soit un cylindre ayant la forme représentée par la figure XXX-4 ; à sa partie inférieure il porte deux ouvertures, dites « lumières », *E* lumière d'échappement et *A* lumière d'admission (le bord supérieur de *E* est plus haut que celui de

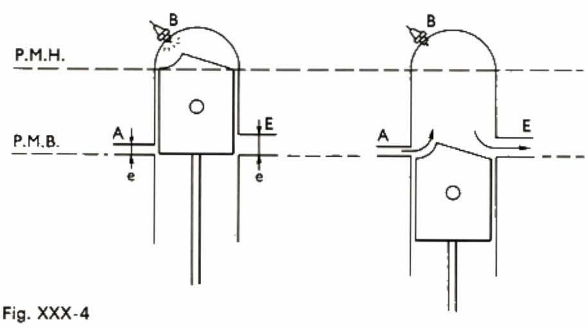


Fig. XXX-4

A) et à sa partie supérieure se trouve une bougie. Supposons que le piston soit au point mort haut (P.M.H.) et que la chambre contienne un mélange carburé, le fonctionnement est alors le suivant :

— *Premier temps :* un train d'étincelles jaillit entre les pointes de la bougie, le mélange brûle, le piston est chassé vers le bas en découvrant d'abord *E* puis *A*. À la fin de ce déplacement dû à la détente des gaz se produit le commencement de l'échappement et celui de l'admission.

— *Deuxième temps :* le piston remonte du P.M.B. au P.M.H. et ferme d'abord *A*, puis *E* ; il comprime ensuite les gaz admis et se retrouve dans sa position de départ. Le deuxième temps comporte donc la fin de l'admission, puis la fin de l'échappement, et la compression.

Ce fonctionnement est représenté par un diagramme en portant en abscisses les volumes occupés par la masse gazeuse et en ordonnées les pressions.

Le diagramme théorique est établi avec les hypothèses suivantes : la combustion est instantanée, la détente et la compression sont adiabatiques, la pression entre l'intérieur du cylindre et l'extérieur s'équilibre instantanément dès que l'on ouvre les ouvertures *A* et *E*. Le compresseur fournit un mélange homogène de composition constante, à température et pression constantes.

Le diagramme (fig. XXX-5) se lit comme suit :

Premier temps : le piston est au P.M.H. le cylindre est rempli de gaz frais comprimés à une pression voisine de 5 bars (point représentatif *B*). L'étincelle jaillit, le mélange

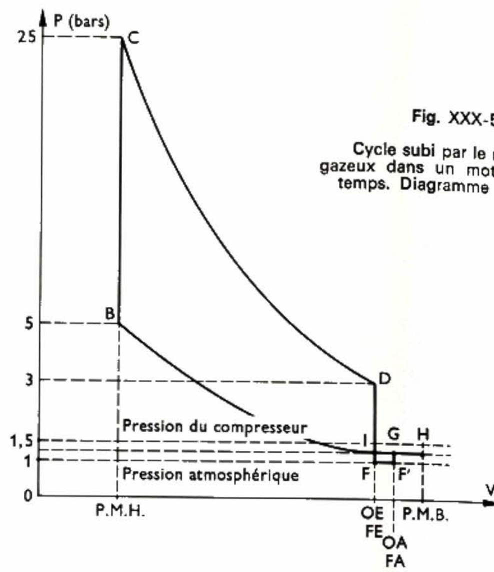


Fig. XXX-5

Cycle subi par le mélange gazeux dans un moteur à deux temps. Diagramme théorique

brûle instantanément, la pression atteint une valeur voisine de 25 bars (verticale *BC*). La détente commence et se poursuit jusqu'au moment où *E* est découvert, la pression décroît de 25 à 3 bars (courbe *CD*). En *D* la lumière d'échappement s'ouvre, la pression devient égale à la pression atmosphérique (*DF* puis *FF'*). L'orifice *A* est découvert, la pression prend une valeur intermédiaire entre la pression atmosphérique et la pression de débit du compresseur (*F'G* puis horizontale *GH*). Notons que de *F* à *F'* le cylindre était empli de gaz brûlés à la pression atmosphérique et que *F'* à *H* ces gaz sont progressivement remplacés par des gaz frais.

Deuxième temps : le piston remonte au P.M.H. Le remplacement des gaz brûlés par des gaz frais se poursuit. Au point *G* la lumière *A* est fermée ; en *I* c'est *E* qui est obturée. La compression commence et se poursuit jusqu'au point *B*. Le second temps est terminé.

Pratiquement le diagramme obtenu expérimentalement a l'allure représentée par la figure XXX-6. L'allumage a lieu en *B'* et la combustion se produit de *B'* à *C* ; détente (*CD*) et compression (*FB*) ne sont pas adiabatiques. L'échappement commence en *D* et la pression correspondant à la position *GH* est voisine de celle du compresseur.

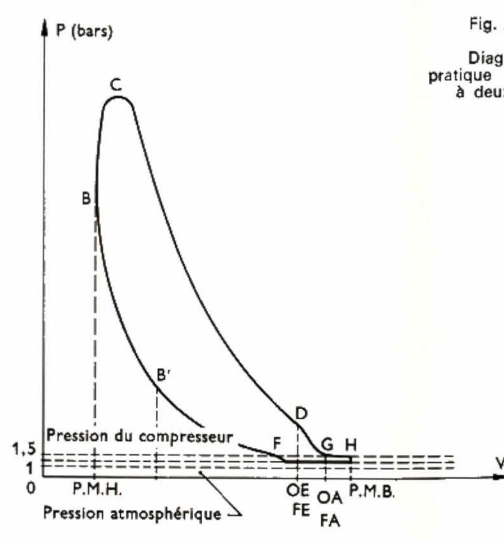
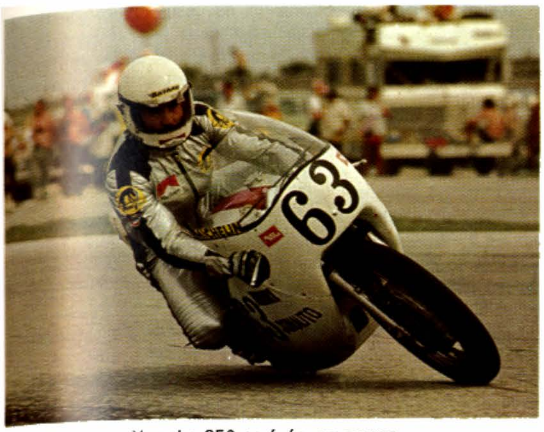


Fig. XXX-6

Diagramme pratique du moteur à deux temps

Sans examen plus approfondi nous voyons qu'à cylindrée égale un moteur deux temps donne plus de puissance qu'un moteur quatre temps (environ 1 fois 1/2) mais son rendement est moins bon (entre autres, nécessité de faire fonctionner un compresseur). L'admission et l'échappement se faisant dans un temps très court, le moteur se prête mal

Motocycles



Yamaha 350 carénée, en course

Grand tourisme



Kawasaki 900 →



BMW R 90, version sport



Honda 750

Tout-terrain



Kawasaki 125



Yamaha 360



Vélomoteur Motobécane XL

Side-cars



BMW 500



König

(Photos : Folie-Dupart - Moto-Revue, Bériot - Kawasaki, BMW, Honda, Yamaha)

à un régime rapide, en revanche, il a un excellent ralenti en charge. Il faut noter que les effets sur le piston ont toujours lieu dans le même sens, ce qui rend les fatigues plus faibles et procure une quasi-impossibilité de cliquetis (reconnus comme étant néfastes).

3.2. Le moteur « trois lumières ». — Dans le moteur « trois lumières » le compresseur est constitué par le carter (fig. XXX-7) qui doit être étanche. Le graissage de l'embiellage est réalisé soit par un réservoir séparé avec pompe, soit par de l'huile que l'on mélange à l'essence, ce qui entraîne une grosse consommation d'huile et de fréquents encrassages des bougies et des lumières. Le mouvement des gaz dans le cylindre est facilité par un déflecteur disposé sur les pistons. Le fonctionnement est mis nettement en évidence par la figure XXX-7.

L'air carburé provenant du carburateur pénètre dans le carter pendant le mouvement du piston du P.M.B. au P.M.H.; au cours de la descente cet air est dirigé vers le cylindre par le canal de transfert. Un tel moteur est particulièrement simple et par suite moins cher qu'un moteur à quatre temps.

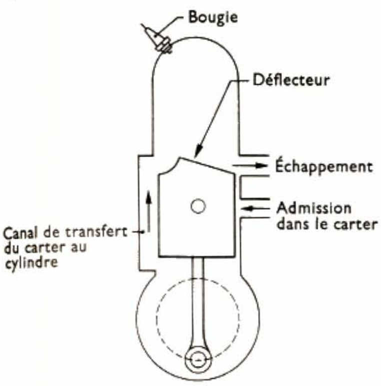


Fig. XXX-7

4. TECHNOLOGIE

PARTIE MÉCANIQUE

4.1. La multiplicité des cylindres. — La multiplicité des cylindres est un important facteur dans la course à la puissance et comme argument de vente. Les cyclomoteurs restent monocylindres. Les vélomoteurs sont souvent bicylindres. Pour les motos, le monocylindre est surtout réservé aux machines tout-terrain, à cause de son étroitesse et de sa rusticité. Les autres ont deux, trois ou quatre cylindres.

Le bicylindre est vertical face à la route (Triumph) ou légèrement incliné (Laverda), ou encore en V face à la route (Guzzi). Parfois les deux cylindres sont placés en V, l'un derrière l'autre et font un angle de 45° (Harley Davidson) ou de 90° (Ducati). On trouve également des motos avec deux cylindres à plat (BMW).

Dans un moteur à trois cylindres ceux-ci sont invariablement en ligne, face à la route. De 250 cm³ à 750 cm³ la gamme Kawasaki est à trois cylindres, deux temps. Un autre constructeur japonais, Suzuki, fait de même mais sa 750 cm³, deux temps, est refroidie par eau. La 350 cm³ Motobécane a également trois cylindres. Les Triumph et Laverda ont des moteurs à quatre temps. Aujourd'hui encore les quatre cylindres sont réservés aux grosses cylindrées. Ils sont face à la route. Le leader, Honda, utilise déjà cette technique pour sa 500 et sa 750 cm³ en attendant de l'appliquer sur les 250 et 350 cm³. Autre quatre cylindres directement issue de la compétition: la 750 MV italienne à double arbre à cames en tête. Signalons également la première 750 cm³, quatre cylindres, deux temps, refroidie par eau, la japonaise Yamaha.

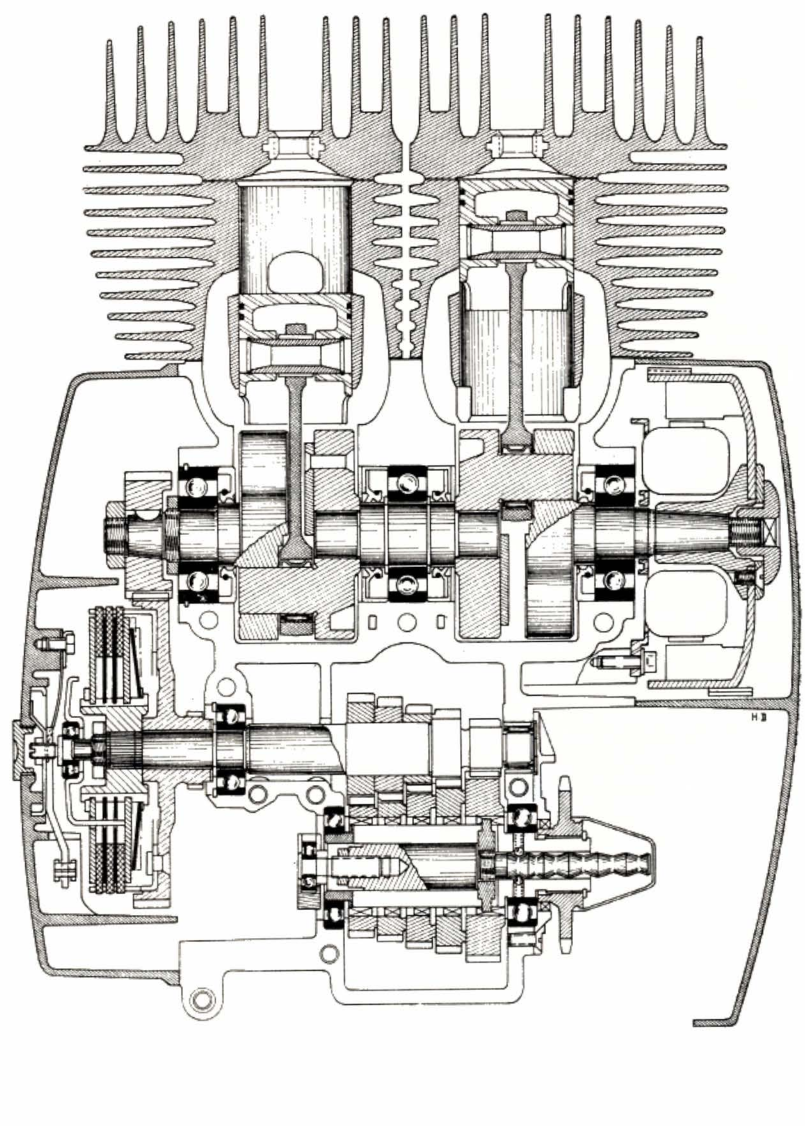


Fig. XXX-8

Coupe de bloc moteur 125 cm³ bicylindre (vue de face) (*Motobécane*)

4.2. Construction des moteurs

4.2.1. Les carters. — Les carters moteurs d'une moto moderne sont faits en alliage léger. Au point de vue fabrication ils sont, soit coulés, soit injectés sous pression, ce qui donne un meilleur fini. Afin d'améliorer l'étanchéité et les facilités de démontage, les carters s'ouvrent suivant un plan horizontal. À part quelques exceptions, les carters moteurs renferment la boîte de vitesses.

4.2.2. L'embiellage. — En général, pour un bicylindre, l'embiellage repose sur quatre roulements, deux par bielle. Quelquefois ces roulements sont graissés sous basse pression. La construction des embiellages motos est particulièrement soignée (V. fig. XXX-8). Les bielles tournent sur roulements à aiguilles, rarement sur coussinets, sauf pour les grosses cylindrées. Le pied de bielle comporte indifféremment bagues de bronze ou roulements à aiguilles. Il ne faut pas oublier que les régimes de 10 000 tr/mn sont couramment atteints et certains moteurs doivent s'y tenir.

4.2.3. Les cylindres. — Ce sont tous des cylindres en alliage léger chemisés fonte. Parfois la chemise est chromée dur (technique Mobylette). Pour les deux temps, dans l'épaisseur des cylindres il y a les canaux de transfert. Jadis les moteurs à deux temps comportaient un seul transfert face à la lumière d'échappement. Aujourd'hui, pour un meilleur balayage, on utilise quatre transferts et même cinq sur les Yamaha.

4.2.4. Les culasses. — Le refroidissement par air étant le plus fréquent, les culasses des moteurs deux temps se caractérisent par un énorme ailetage pour le refroidissement et par une chambre de combustion dite en « casquette de jockey ». Sur les moteurs à deux temps comme sur les moteurs à quatre temps le diamètre de la chambre de combustion est un peu plus petit que celui de l'alésage de façon à engendrer un effet de giclage dit *squish* (fig. XXX-9). Pour faciliter les réparations et l'échange de pièces sur les multicylindres deux temps, cylindres et culasses peuvent se démonter séparément.

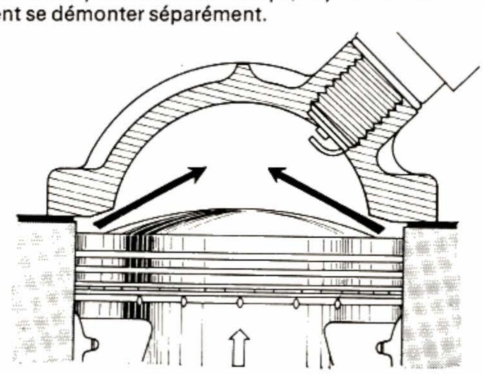


Fig. XXX-9 — Zone d'injection où se produit l'effet « squish »

4.2.5. La distribution. — Tous les moteurs à quatre temps ont les soupapes en tête mais leur mode de distribution peut être différent : il y a le culbuté, le simple arbre à cames en tête et le double arbre à cames en tête. L'entraînement de l'arbre à cames en tête se fait par chaîne. Pour le rappel des soupapes on trouve des ressorts ou des barres de torsion (450 Honda) ou aussi des commandes desmodromiques à arbre à cames en tête pour le rappel des soupapes (technique Ducati).

4.2.6. Le graissage

1° Sur le moteur à quatre temps le graissage se fait ou par barbotage (petite cylindrée) ou par pompe, comme sur une automobile. L'huile est alors contenue dans les carters moteurs. On peut aussi trouver des graissages à carters secs (huile dans un réservoir additionnel) mais dans ce cas il y a deux pompes.

2° Sur un moteur à deux temps, il y a deux types de graissage :

— par mélange d'huile dans le réservoir d'essence, la proportion d'huile ajoutée étant proche de 6 % ;

— par graissage séparé. Dans ce cas l'huile est contenue dans un réservoir à part et une pompe fournit la quantité d'huile exactement nécessaire au mélange gazeux, le débit de cette pompe variant proportionnellement à l'ouverture des gaz. Le débit est réglé par la rotation de la poignée de gaz. L'huile est directement envoyée dans la buse du carburateur ou dans les fûts de cylindre. Certains graissages séparés envoient de l'huile sous basse pression dans les roulements d'embiellage. Ce système, qui vient du Japon, évite notamment la calamine et les grosses émissions de fumée.

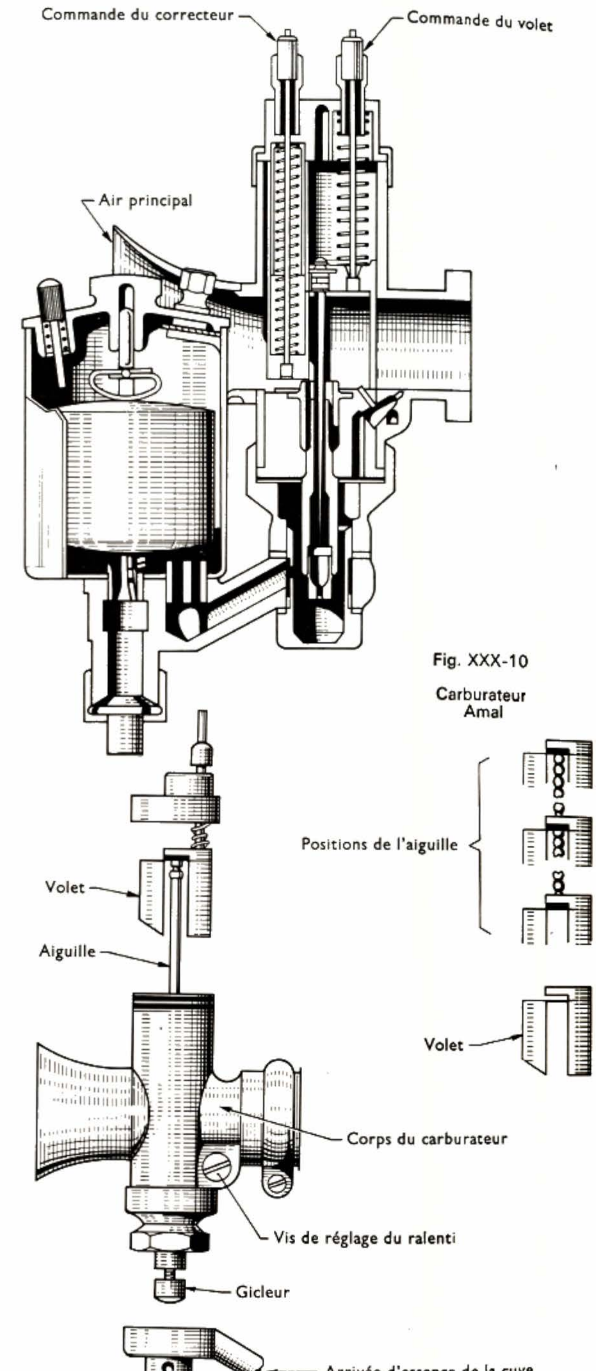


Fig. XXX-10

Carburateur Amal

4.2.7. Les carburateurs. — Pour la majorité des motocycles la préparation du mélange gazeux combustible est assurée par un carburateur semi-automatique du type à aiguille dont l'orifice d'entrée d'air et le gicleur ont une section variable. Le plus connu de ces carburateurs est le carburateur Amal (fig. XXX-10). Le volet évidé des gaz

peut monter et descendre en même temps que l'aiguille profilée sous l'action d'une commande souple. Le correcteur d'air coulisse à l'intérieur des volets et permet de diminuer la section de passage d'air. L'aiguille porte des crans correspondant aux positions qu'elle peut prendre par rapport au volet. En abaissant l'aiguille on obtient un appauvrissement du mélange et inversement. Notons que le gicleur est marqué d'un numéro qui correspond non pas à son diamètre comme pour les gicleurs des automobiles, mais à son débit en centimètres cubes par minute sous une aspiration déterminée. Le gicleur est réglé pour la plus grande vitesse, et la position de l'aiguille pour les ouvertures moyennes.

Les machines puissantes, et en particulier les motocyclettes, ont souvent un carburateur automatique analogue à ceux des voitures.

Sur un moteur moderne chaque cylindre possède son carburateur. Ce sont des carburateurs du type horizontal avec cuve séparée, fixée sous la pipe d'admission. Dans le cas d'un moteur à quatre cylindres la commande des carburateurs se fait par câble ou par palonnier. Pour résoudre les problèmes d'engorgement, les moteurs poussés des motos Honda sont équipés de carburateurs de type SU (levée du boisseau par dépression) : du ralenti à pleine ouverture, ces carburateurs utilisent jusqu'à quatre gicleurs différents.

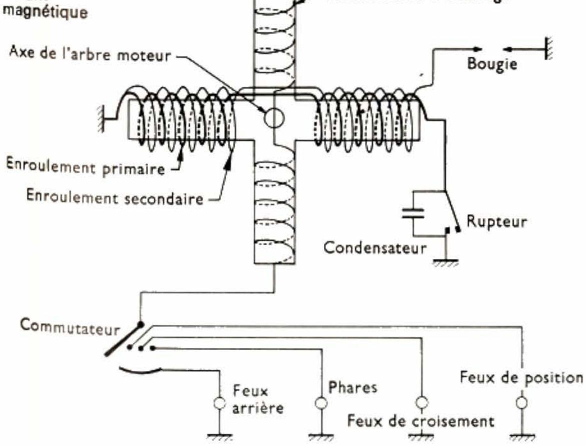
Au salon de Tokyo 1971 apparut pour la première fois un moteur à deux temps à injection (750 Yamaha) et, plus récemment une 500 cm³ Motobécane à trois cylindres à injection électronique.

4.2.8. L'allumage. — Les allumages par magnéto et volant magnétique sont utilisés sur les petites cylindrées (allumage analogue à celui d'une automobile). Cependant sur des moteurs monocylindriques on trouve un appareil combiné formé d'une magnéto à volant tournant pour assurer l'allumage, et d'une dynamo fournissant l'énergie nécessaire au fonctionnement des récepteurs électriques. Les deux appareils électriquement distincts sont réunis dans le même boîtier et l'entraînement par l'arbre moteur est unique.

1° *Le volant magnétique* (fig. XXX-11) est constitué par un volant portant deux aimants retenus par des vis. Deux enroulements de faible longueur disposés sur une carcasse fixe de fer doux feuilleté sont soumis aux variations périodiques de flux produit par la rotation du volant avec ses aimants. L'un des enroulements alimente le dispositif d'éclairage, l'autre joue le rôle de l'enroulement primaire d'une magnéto à aimants tournants. Il engendre un flux magnétique variable dans un enroulement secondaire de fil fin et long bobiné sur lui. L'extrémité isolée de cet enroulement est reliée à l'électrode centrale de la bougie tandis que l'autre extrémité est reliée à la masse. L'allumage se produit quand un rupteur coupe le courant primaire, au moment où celui-ci est maximal; la f.é.m. induite dans l'enroulement secondaire est aussi suffisamment grande pour qu'une étincelle éclate entre les électrodes de la bougie.

Fig. XXX-11

Volant magnétique



2° *Des motos sont équipées d'un allumage avec batterie et bobine d'induction, comme les automobiles* (V. t. 4, La route, chap. 23) ; la batterie est rechargée par un ensemble alternateur-redresseur. Les moteurs à deux temps, plus sensibles à l'allumage qu'un moteur à quatre temps, commencent à être équipés d'allumages électroniques. L'allumage électronique présente bien des avantages : suppression du rupteur, grande précision du point d'allumage, plus grand nombre d'étincelles dans un temps très court, pas de réglages à refaire, étanchéité totale. En compétition, pour les moteurs à deux temps, l'allumage électronique se généralise.

4.2.9. L'échappement. — L'échappement libre, théoriquement le meilleur, étant très bruyant il a été nécessaire d'utiliser des silencieux (fig. XXX-12). Malheureusement, un bon silencieux absorbe environ 10 % de la puissance du moteur et souvent davantage. Aussi de trop nombreux motocyclistes ont-ils tendance à gagner de la puissance, donc de la vitesse, en supprimant ou en trouant une chicane des silencieux; cela a pour conséquence d'augmenter le bruit des machines alors que les moteurs à deux ou à quatre temps, à refroidissement par air, sont déjà loin d'être silencieux. D'origine une moto ne devrait pourtant pas être plus bruyante qu'une automobile, ayant un moteur de même type; malheureusement il n'en est pas souvent ainsi dans la pratique.

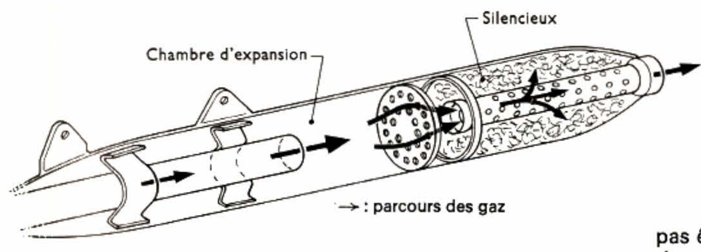


Fig. XXX-12 — Construction interne d'un silencieux

4.2.10. Le kick-starter. — Pour démarrer un moteur de moto, il faut un kick-starter, sorte de lanceur à pied qui agit sur le pignon primaire du vilebrequin par l'intermédiaire de l'arbre primaire de la boîte de vitesses. La mise on route est facilitée par un décompresseur; ce dispositif, actionné par une manette à la disposition du conducteur, permet l'établissement d'une communication permanente du cylindre avec l'atmosphère. Il maintient ouvertes la soupape d'échappement (moteur à quatre temps) et une soupape ad hoc maintenue sur son siège par un ressort (moteur à deux temps). Le décompresseur permet en outre l'arrêt du moteur. La multiplicité des cylindres, donc la réduction de la cylindrée unitaire, facilite la mise en route. Toutefois, la plupart des grosses cylindrées d'aujourd'hui sont équipées d'un démarreur électrique, genre dynastar ou petit moteur électrique individuel.

4.2.11. La boîte de vitesses. — La boîte de vitesses est d'une conception mécanique qui évolue très peu, à cela près que l'on en augmente le nombre de rapports : de trois jusqu'à cinq et exceptionnellement six (V. fig. XXX-13). Il n'y a pas de marche arrière sauf sur certaines boîtes de side-car. Le principe de fonctionnement est identique à celui de l'automobile. La boîte de vitesses est actionnée par un sélecteur au pied, placé à droite ou à gauche du moteur. Pour « monter » les vitesses on appuie sur le sélecteur et on le lève pour les « descendre ». Le point mort se trouve entre la première et la seconde. Une excellente boîte de vitesses supporte le changement de rapport sans qu'il soit nécessaire de débrayer (c'est notamment le cas de toutes les boîtes de vitesses japonaises). Les cyclomoteurs n'ont pas, en principe, de boîte de vitesses ni d'ailleurs d'embrayage.

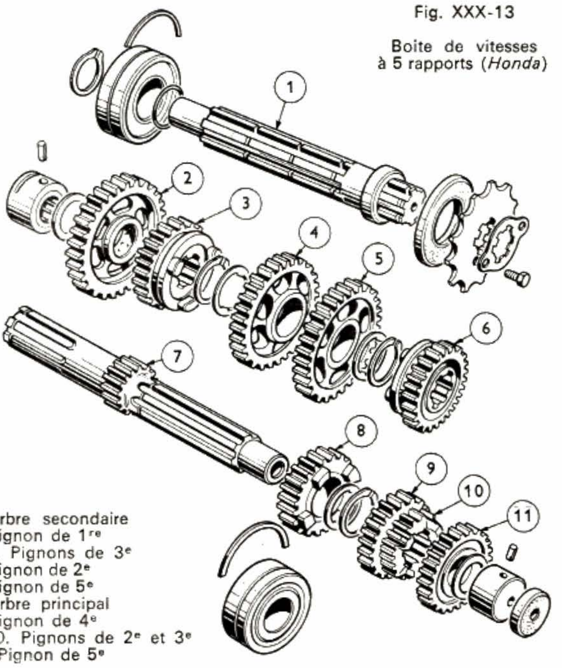


Fig. XXX-13

Boîte de vitesses à 5 rapports (*Honda*)

1. Arbre secondaire
2. Pignon de 1re
3.-4. Pignons de 3e
5. Pignon de 2e
6. Pignon de 5e
7. Arbre principal
8. Pignon de 4e
9.-10. Pignons de 2e et 3e
11. Pignon de 5e

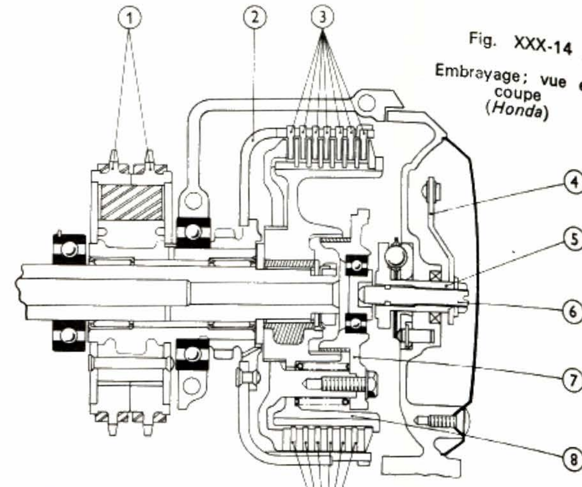


Fig. XXX-14

Embrayage; vue en coupe (*Honda*)

1. Pignons de transmission primaire
2. Tambour d'embrayage
3. Disques entraînants
4. Commande d'embrayage
5. Rampe à billes,
6. Doigt de poussée
7. Plateau de pression
8. Noix d'embrayage
9. Disques entraînés

4.2.12. L'embrayage. — Il existe deux sortes d'embrayage pour les motos : le multidisque et le diaphragme. Le premier est le plus usité (fig. XXX-14). Il se compose de disques de métal et de disques avec garniture à base d'amiante ; le tout fonctionne dans l'huile. Ce type d'embrayage est très doux et très progressif. L'embrayage à diaphragme fonctionne à sec. Il est identique à celui des automobiles. L'embrayage est commandé soit par une pédale, soit par une manette ou à la fois par les deux. Les dispositifs modernes tels que l'embrayage hydraulique ou magnétique, sans débrayage, ne sont pas usités sur les motocycles.

4.2.13. Transmission primaire. — La transmission primaire est celle qui transmet la puissance du moteur à la boîte de vitesses. Il s'agit soit d'une chaîne, soit d'un engrenage. Pour leurs motos, les Britanniques traditionalistes restent fidèles à la transmission primaire par chaîne, simplex, duplex ou triplex. Au contraire, les Japonais ont tous adopté la transmission par pignon à taille oblique pour réduire le bruit. Sur les petites et moyennes cylindrées, le pignon de sortie de vilebrequin attaque directement la couronne d'embrayage.

4.2.14. Transmission secondaire. — La transmission secondaire permet le transfert de la puissance de la boîte de vitesses à la roue. À l'heure actuelle, à part BMW, Guzzi et MV, toutes les autres marques de motocycles utilisent la transmission secondaire par chaîne. Les trois marques citées possèdent des transmissions acatènes par arbre à cardans (fig. XXX-15). Parmi les cyclomoteurs, la marque Solex possède des machines à transmission par cardan et d'autres par galet sur la roue avant.

PARTIE CYCLE

4.3. Le cadre. — Le cadre est le squelette du motocycle. C'est sur lui que viennent se fixer le moteur, les différents organes et les pièces d'équipement. Sa qualité principale doit être la rigidité.

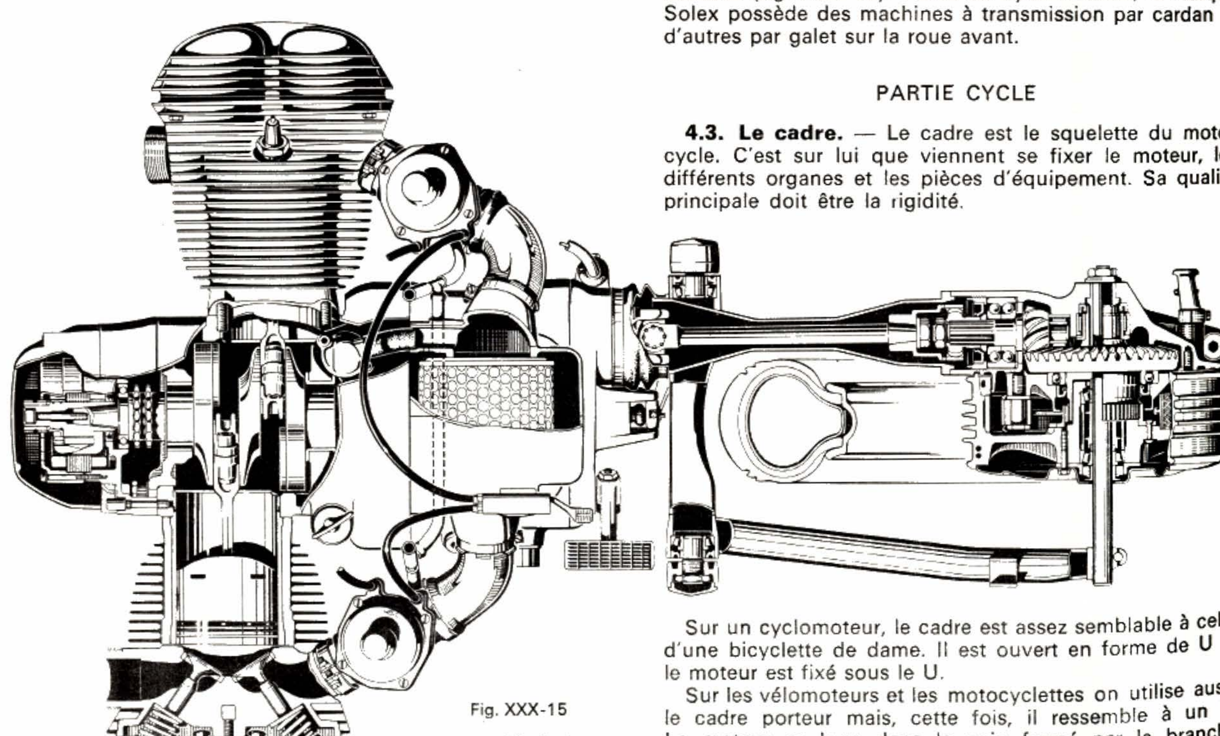


Fig. XXX-15

Moteur bicylindre (750 cm³) avec sa transmission secondaire par cardan (*BMW*)

Sur un cyclomoteur, le cadre est assez semblable à celui d'une bicyclette de dame. Il est ouvert en forme de U et le moteur est fixé sous le U.

Sur les vélomoteurs et les motocyclettes on utilise aussi le cadre porteur mais, cette fois, il ressemble à un Y. Le moteur se loge dans le coin formé par la branche gauche et le pied du Y. Ce cadre porteur peut être fait en gros tube, en petits tubes formant treillis (Laverda) ou en tôle emboutie (Honda 125).



Fig. XXX-16

Cadre double berceau avec détail de la colonne de direction (*BMW*)

Le cadre *simple berceau* comporte une épine dorsale (un tube supérieur qui part de la colonne de direction et descend jusque derrière le moteur) et un tube simple qui descend de la colonne de direction, passe devant le moteur et se dédouble sous le moteur. Il manque de rigidité.

Le plus usité sur les motocyclettes est le cadre *double berceau*, avec épine dorsale à un tube ou deux (fig. XXX-16). Cette fois, deux tubes descendent de la colonne de direction et passent sous le moteur. Ils procurent une rigidité transversale satisfaisante.

Dans un cadre, le moteur peut être fixé en trois points: par le dessus, au niveau de la culasse; par-derrière au niveau de la boîte de vitesses; par-devant, sur les carters d'embiellage.

Le bras oscillant arrière fait partie du cadre. C'est une fourche qui tient la roue arrière et qui est articulée à sa base sur l'arrière du cadre, au niveau de la boîte de vitesses.

4.4. La direction. — La direction des motocycles est toujours obtenue par pivotement de la roue avant autour d'un axe passant par une douille incurvée, placée à l'avant du cadre. L'axe de pivotement étant monté sur roulement à billes, pour éviter que la direction ne devienne trop souple on monte un frein de direction constitué par deux plateaux, l'un solidaire de l'axe de pivotement, l'autre solidaire du cadre. Une vis à gros boulon, à la disposition du pilote, permet de serrer plus ou moins les deux plateaux l'un contre l'autre et, par suite, de durcir plus ou moins la direction. La présence du frein ne gêne en rien aux grandes vitesses; toutefois, il faut le desserrer pour les virages pris au ralenti.

4.5. Les roues. — Leur diamètre est compris entre 16 et 21 pouces (40 et 54 cm environ). Celles de 21 pouces sont à utiliser sur les machines tout-terrain. Les roues ont des jantes en acier chromé ou en duralumin et sont uniquement du type à rayons. Cependant, des roues en magnésium, dont les rayons sont remplacés par de grosses branches, sont parfois utilisées (surtout à titre expérimental).

4.6. Les freins. — Ils ont grandement progressé depuis quelque temps et cela grâce à la compétition. À part sur quelques cyclomoteurs bon marché, le frein à patins n'est plus utilisé. Le frein à tambour s'est tout d'abord allégé par l'utilisation intensive de matériaux légers: les tambours d'un diamètre pouvant atteindre 250 mm sont en aluminium fretté acier. Le frein simple came à deux segments, l'un engageant, l'autre traîné, primitivement monté sur la roue avant, se trouve maintenant sur la roue arrière, cette dernière nécessitant plus de progression et moins de puissance. À l'avant on utilise le frein double came dont les deux segments sont engageants. Il y a aussi des réalisations comportant deux freins double came. Tous les segments portent des garnitures collées. Le principal défaut du frein à tambour est le *fading* (mot anglais signifiant évanouissement). Ce défaut n'apparaît pas sur les freins à disque qui équipent la roue avant d'un bon nombre de grosses cylindrées. Ces freins à disque (un ou deux disques) sont à commande hydraulique. De petites cylindrées possèdent des freins à disque à commande mécanique. Avec de tels freins les distances de freinage d'une moto sont assez voisines de celles d'une automobile. À noter que les prescriptions du Code de la route français pour le freinage des motocycles sont moins exigeantes que pour les voitures particulières.

4.7. La fourche. — Tous les motocycles modernes ont des fourches avant télescopiques. Sur un cyclomoteur elle est faite de deux tubes qui coulissent l'un dans l'autre et d'un ressort; sur les machines puissantes elle est hydraulique (fig. XXX-17). Elle peut avoir un débattement de douze à dix-huit centimètres. Les meilleures fourches télescopiques sont à double effet d'amortissement, à l'enfoncement et à la détente.

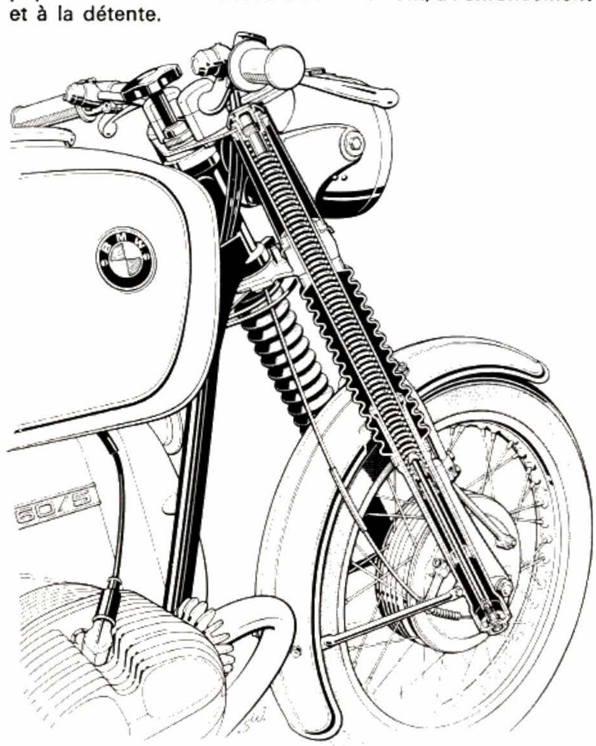


Fig. XXX-17 — Fourche télescopique hydraulique (*BMW*)

4.8. Les suspensions arrière. — La suspension arrière d'une motocycle est assurée par deux amortisseurs qui relient le bras oscillant au cadre. Ces amortisseurs sont souvent réglables en dureté suivant que l'on voyage avec plus ou moins de charge; ils sont hydrauliques et peuvent être à double effet.

LES PIÈCES D'ÉQUIPEMENT

4.9. Le réservoir. — Ou il fait partie intégrante du cadre comme sur certains cyclomoteurs, ou il se pose sur

l'épine dorsale du cadre. Sa capacité varie de trois à trente litres. Il comporte des robinets d'essence à trois positions : fermé, ouvert, réserve. Sur quelques deux-temps japonais une membrane bouche l'orifice de sortie du robinet dès que le moteur s'arrête (ainsi le moteur ne peut être « noyé » si le conducteur oublie de fermer le robinet). Quelques marques de motos utilisent le plastique pour la fabrication des réservoirs.

4.10. La selle. — C'est un équipement important dont dépend le confort du motocycle. Parfois la selle pivote sur un axe, elle donne ainsi accès à l'équipement électrique (batteries), à la trousse à outils, ou, éventuellement, au bouchon de remplissage d'un réservoir d'huile.

4.11. Les instruments de contrôle. — Sur les cyclomoteurs, et encore pas sur tous, il y a seulement un compteur. Les vélomoteurs les plus évolués possèdent un tableau de bord digne d'une grosse cylindrée (fig. XXX-18) soit : compteur avec totalisateur journalier, compte-tours, voyant de point mort, de plein phare, de clignotants (celui de pression d'huile est réservé aux quatre temps). Sur les Harley Davidson on peut même monter, en option un allume-cigares.



Fig. XXX-18 — Tableau de bord de motocyclette

4.12. Les garde-boue. — Leur rôle est de protéger tout en étant esthétiques : c'est pour cela que l'on voit bon nombre de garde-boue chromés. Pour les motos tout-terrain, où ils sont mis à rude épreuve, les garde-boue sont en plastique parfois incassable.

4.13. Les guidons. — Suivant le goût du pilote, les guidons peuvent être de différentes formes. Il y a les cintres plats, ceux en forme de cornes de vache et aussi les guidons bracelets très courts et prenant attache sur le T supérieur de la fourche. Sur les guidons sont fixés les leviers d'embrayage, à gauche, et de freins avant, à droite. On y trouve aussi les commandes de clignotants, d'avertisseur et de l'éclairage.

4.14. L'appareillage électrique. — Comme sur une automobile on trouve une veilleuse, un feu de croisement (code) et un feu de route (phare). Parfois il y a possibilité d'appel de phare. Cet équipement peut être complété par une veilleuse de stationnement. Une pression sur le frein avant ou sur le frein arrière allume le stop. Quelques modèles sont équipés d'un coupe-circuit. Pour établir le contact de mise en route du moteur et de fonctionnement de tout l'appareillage électrique on se sert d'une clé, comme sur une automobile. Sur tous les modèles japonais, les clignotants (deux à l'avant, deux à l'arrière) sont de rigueur. Les marques européennes commencent à suivre cette tendance.

4.15. Les pneumatiques. — Le profil des pneus est du type rond ou légèrement triangulaire. En ligne droite le pneu triangulaire roule sur sa pointe ; dans les virages il s'appuie sur les côtés du triangle. Le pneu avant peut ne comporter que des sculptures longitudinales, tandis que celui de l'arrière possède obligatoirement des sculptures en zigzag.

4.16. Divers. — Sur un motocycle moderne on trouve aussi : un amortisseur de direction qui contrôle les effets de shimmy, un antivol qui bloque la direction en position braquée, une béquille centrale et parfois (en plus) une béquille latérale.

5. UTILISATION

La moto connaît un grand renouveau en France et dans le monde : aux États-Unis d'Amérique, environ neuf millions de motocycles sont en circulation (sans compter les cyclomoteurs). En France on note une augmentation annuelle voisine de 65 %.

5.1. Pour le travail. — À proprement parler le motocycle utilitaire est le cyclomoteur. Peu cher, d'entretien facile et d'utilisation simple, il est aussi fonctionnel qu'un appareil ménager. Le motocycle permet de résoudre aisément les problèmes d'encombrement et de stationnement mais n'offre aucune protection contre les intempéries.

5.2. Pour les loisirs. — Il s'agit peut-être là de la fonction primordiale d'une moto. Le deux-roues est un merveilleux objet de loisir et de sport. Le pilotage d'une moto apporte quelque chose de nouveau dans la vie : une certaine assurance, une sensation de liberté, une griserie aussi. À vitesse égale une moto est plus impressionnante qu'une automobile. Dans sa version tout-terrain, la moto permet d'approcher ce que le cheval peut faire.

5.3. Les sports motocyclistes. — Ils sont aussi nombreux que variés. La vitesse est bien entendu le sport noble. Les motos de vitesse ont sérieusement fait progresser les modèles de route. Il existe un championnat du monde qui se dispute sur une douzaine d'épreuves courues dans toute l'Europe et qui, en fin de saison, sacre six champions du monde, un par catégorie : 50 cm³, 125 cm³, 250 cm³, 350 cm³, 500 cm³ et side-car 500 cm³.

Comme en automobile, il existe des courses d'endurance dont la plus importante est le Bol d'or (elle dure vingt-quatre heures.)

Autre discipline très populaire, le moto-cross (une course de vitesse tout-terrain). Il y a plus de trois cents moto-cross par an en France et le championnat du monde de moto-cross se dispute en 250 cm³ et 500 cm³.

Le *trial* est un jeu d'adresse. Il s'agit de franchir des sections de terrain particulièrement « cahoteuses » sans que le pilote pose pied à terre. Entre le trial et le moto-cross, il y a l'endurance en tout-terrain dont la plus célèbre épreuve dure six jours.

Quelques disciplines sont peu pratiquées en France telles le *speedway*, les courses sur glace, le *dragster*.

AÉRONAUTIQUE

LE MILIEU

1. INTRODUCTION

Le milieu où évoluent les avions et engins aérospatiaux divers correspond d'abord à la mince pellicule atmosphérique qui enveloppe notre planète, ensuite aux vastes espaces interplanétaires, pratiquement vides de toute matière, seulement soumis aux champs magnétiques et de gravitation comme aux rayonnements électromagnétiques. Dans l'atmosphère, le milieu gazeux habituel se caractérise par des propriétés physiques et chimiques généralement mises à profit par les véhicules aérospatiaux pour assurer leur déplacement: les moteurs et réacteurs utilisent l'oxygène de l'air pour comburant et les ailes ou dérives s'appuient sur les gaz, plus ou moins denses selon l'altitude. Mais les mouvements de l'atmosphère, vents et turbulence associés, les nuages et les orages, l'ozone et les couches ionisées déterminent des conditions de vol dont on ne peut s'affranchir, faute de pouvoir les maîtriser, et qu'il convient de connaître afin de les exploiter ou de les surmonter au mieux. C'est le but de ce chapitre introductif que de décrire schématiquement les principales caractéristiques, physiques et chimiques, du milieu dans lequel évoluent les matériels aérospatiaux.

2. LES BASSES COUCHES DE L'ATMOSPHÈRE

Au voisinage du sol, l'atmosphère est directement soumise à des effets de contact avec le sol, qui se traduisent aussi bien par des échanges thermiques, dictant la convection, que par la création de turbulences liées à la rugosité et à l'orographie du lieu considéré. Ce domaine d'atmosphère comprend toujours la couche limite, de quelques mètres ou dizaines de mètres d'épaisseur, et généralement aussi la couche immédiatement sus-jacente; il s'étend ainsi du sol jusqu'à quelques centaines de mètres.

2.1. Composition chimique. — Mis à part certains composants occasionnels provenant de diverses sources de pollution généralement néfastes, la composition chimique de l'atmosphère sèche au voisinage du sol reste très remarquablement constante quant à ses constituants fondamentaux: le gaz principal reste l'azote (78,09 % en volume), immédiatement suivi de l'oxygène (20,95 % en volume). Viennent ensuite, dans l'ordre d'importance: l'argon (0,93 %), le gaz carbonique (0,03 %), le néon (0,002 %), puis l'hélium, divers gaz rares et composés oxygénés ou hydrogénés, sans oublier un gaz radioactif, le radon, ni l'ozone de teneur variable, de l'ordre de 10^{-6}. Ces proportions restent pratiquement les mêmes au niveau de la mer et au sommet des montagnes les plus élevées. Toutefois, la proportion de la vapeur d'eau varie assez sensiblement selon les climats, les saisons et les influences locales, le rapport des extrêmes étant de l'ordre de 1 à 6 (de 0,5 % à 3 %) pour les altitudes faibles.

2.2. Caractéristiques physiques. — À cette composition chimique constante de l'air sec peuvent être associés divers paramètres physiques: dans les conditions normales de température et de pression ($p = 1\,013{,}25$ mbar; $T = 0$ °C), la densité unité de l'air sec correspond à une masse volumique voisine de 1,293 gramme par décimètre cube, non négligeable.

L'influence de la teneur variable en vapeur d'eau se traduit en particulier par de légères variations de cette densité, celle-ci diminuant lorsque, à pression et température inchangées, l'humidité de l'air augmente. On peut ainsi caractériser l'air humide par sa température virtuelle, température que devrait avoir l'air sec à la même pression pour avoir la même masse volumique. Cette température virtuelle T_v est évidemment toujours supérieure à celle T de l'air et s'obtient par la formule simplifiée, exprimée en kelvins:

$$T_v = T\,(1 + 0{,}608\,r) = T + \Delta T$$

où $\Delta T = 0{,}608\,T.r$

Le « rapport de mélange » r définit le rapport de la masse de vapeur d'eau à la masse d'air sec pour un volume d'air humide déterminé; si e est la tension de vapeur d'eau et si p est la pression atmosphérique totale, $r = 0{,}622 \dfrac{e}{p - e} \approx 0{,}62\,\dfrac{e}{p}$. Cette notion sera précisée au paragraphe traitant de l'humidité atmosphérique (V. § 2.3.3). Le terme ΔT est normalement compris entre 0,2 et 3 K, généralement voisin de 1 ou 2 K, et intervient directement sur les portances et les effets aérodynamiques.

Quant à la viscosité dynamique de l'air, elle varie de 1,6 à $1{,}9 . 10^{-5}$ poiseuille entre — 20 et + 40 °C et sa viscosité cinématique s'échelonne ainsi de 0,12 à 0,16 cm²/s.

Densité et viscosité varient sensiblement avec la pression et faiblement avec la température, alors que la vitesse du son n'est pratiquement fonction que de la température (fig. 1).

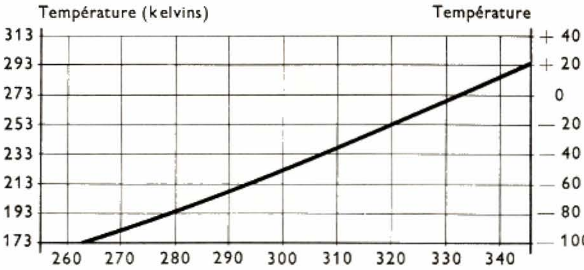


Fig. 1 — Variation de la vitesse du son dans l'air en fonction de la température

2.3. Paramètres météorologiques. — Couramment mesurés par les services météorologiques, ces paramètres déterminent les caractéristiques physiques principales de l'air que l'on peut considérer, en première approximation, comme un gaz parfait dont la masse moléculaire est voisine de 29.

2.3.1. Température. — Au sol, les températures de l'air peuvent varier de — 30 °C à + 35 °C dans nos régions, alors que les extrêmes relevés sont d'environ — 70 °C et + 50 °C. Les moyennes annuelles des températures restent voisines de + 15 °C dans les pays tempérés et n'atteignent + 30 °C que dans quelques zones désertiques tropicales, caractérisées par de très fortes variations de température entre le jour et la nuit (30 °C, par exemple). Sur mer, les fluctuations de température sont nettement atténuées.

2.3.2. Pression. — Au niveau moyen de la mer, la pression atmosphérique moyenne est voisine de 1 015 millibars mais elle peut varier entre 940 mbar (dépression) et 1 050 mbar (anticyclone). La pression moyenne décroît régulièrement avec l'altitude, d'environ 1 mbar pour 9 m : elle est proche de 900 mbar à 1 000 m, de 800 mbar à 2 000 m, de 700 mbar à 3 000 m, de 500 mbar à 5 500 m (fig. 2 et 3).

Notons que la pression normale de 1 013,25 mbar correspond à 760 mm de mercure (rapport de 3 à 4 entre ces deux unités), ou encore à 29,92 pouces de mercure ; l'unité millibar (mbar), tolérée, vaut 100 pascals.

2.3.3. Teneur en vapeur d'eau. — L'air atmosphérique, toujours humide, contient une certaine quantité de vapeur d'eau. Cette quantité est très variable et on peut la caractériser :

— soit par le rapport de mélange (V. § 2.2) ;

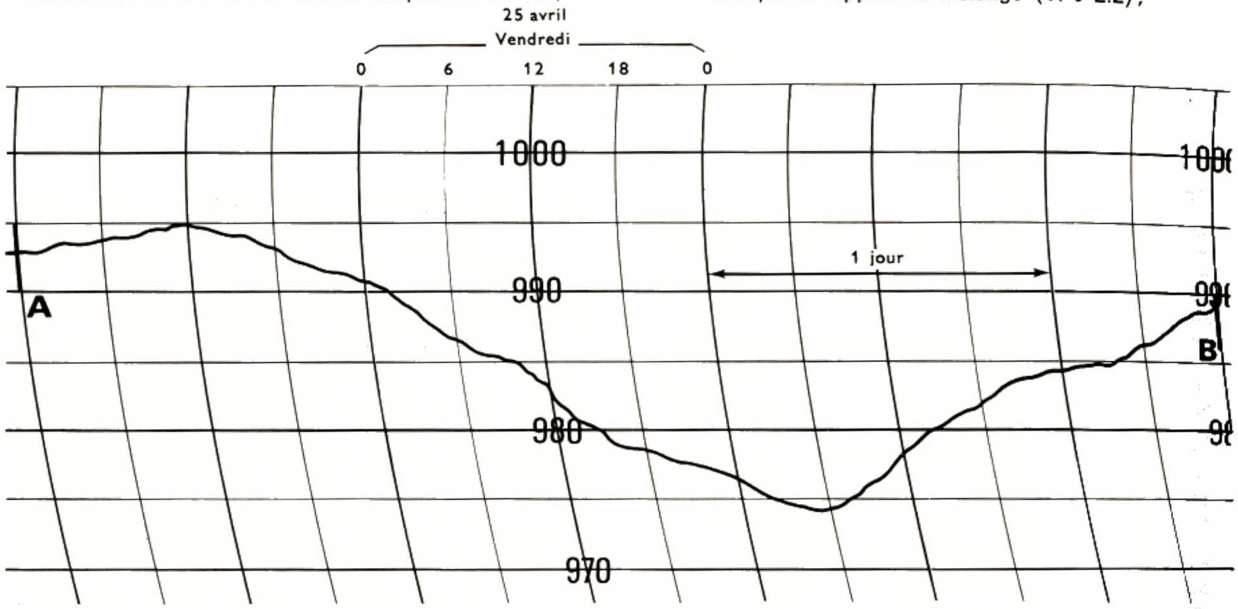
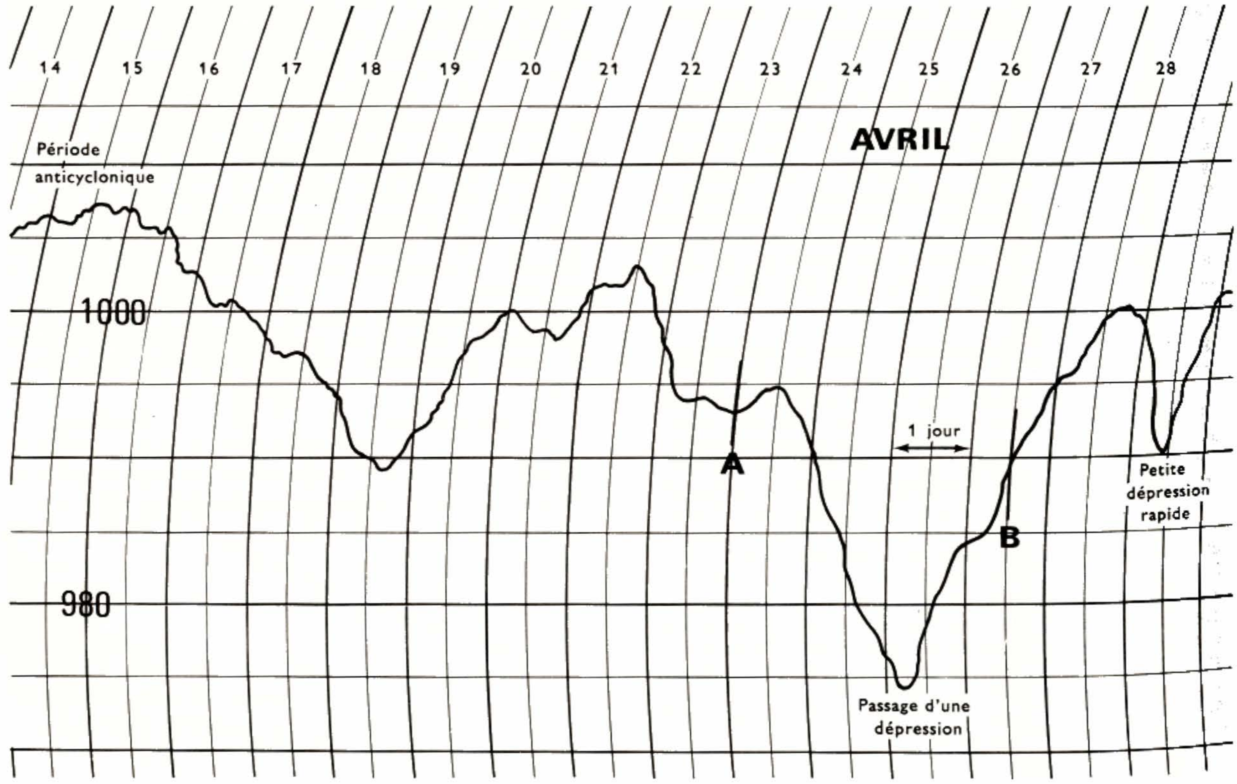


Fig. 2 — Exemples d'enregistrements de pression : en haut, hebdomadaires ; en bas, mensuels (*Météorologie nationale*)



JANVIER

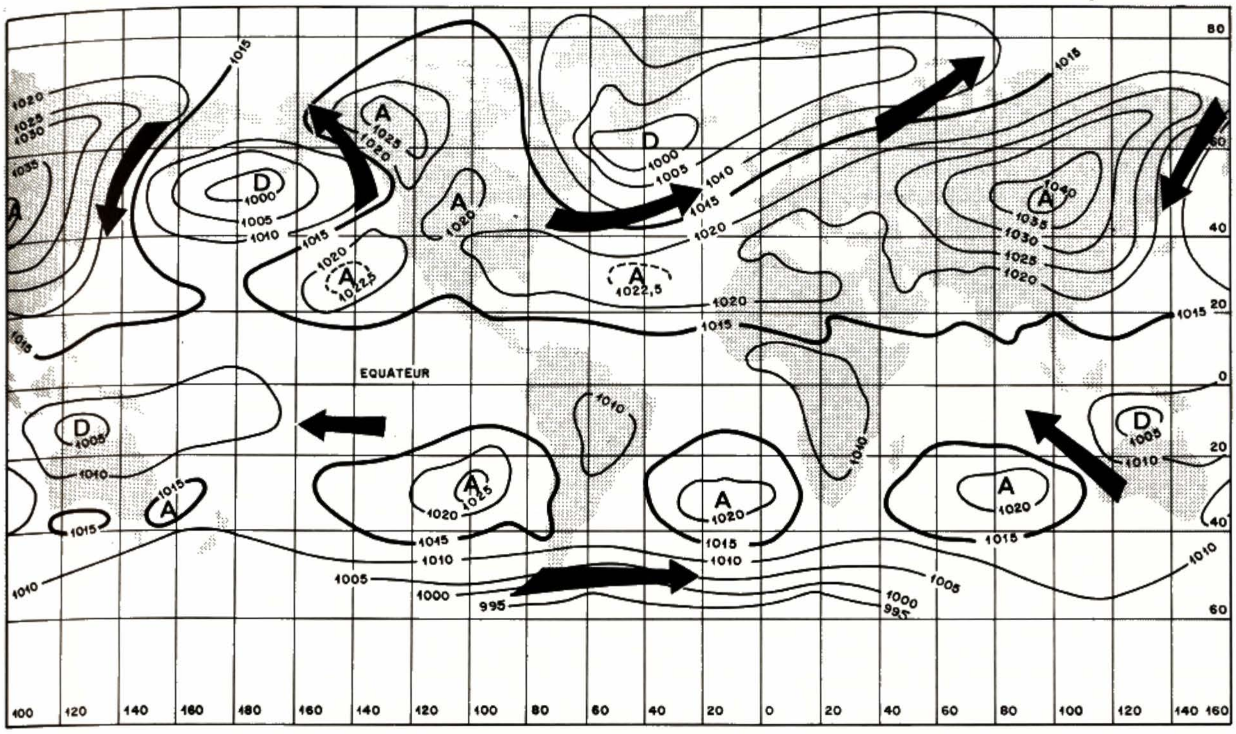
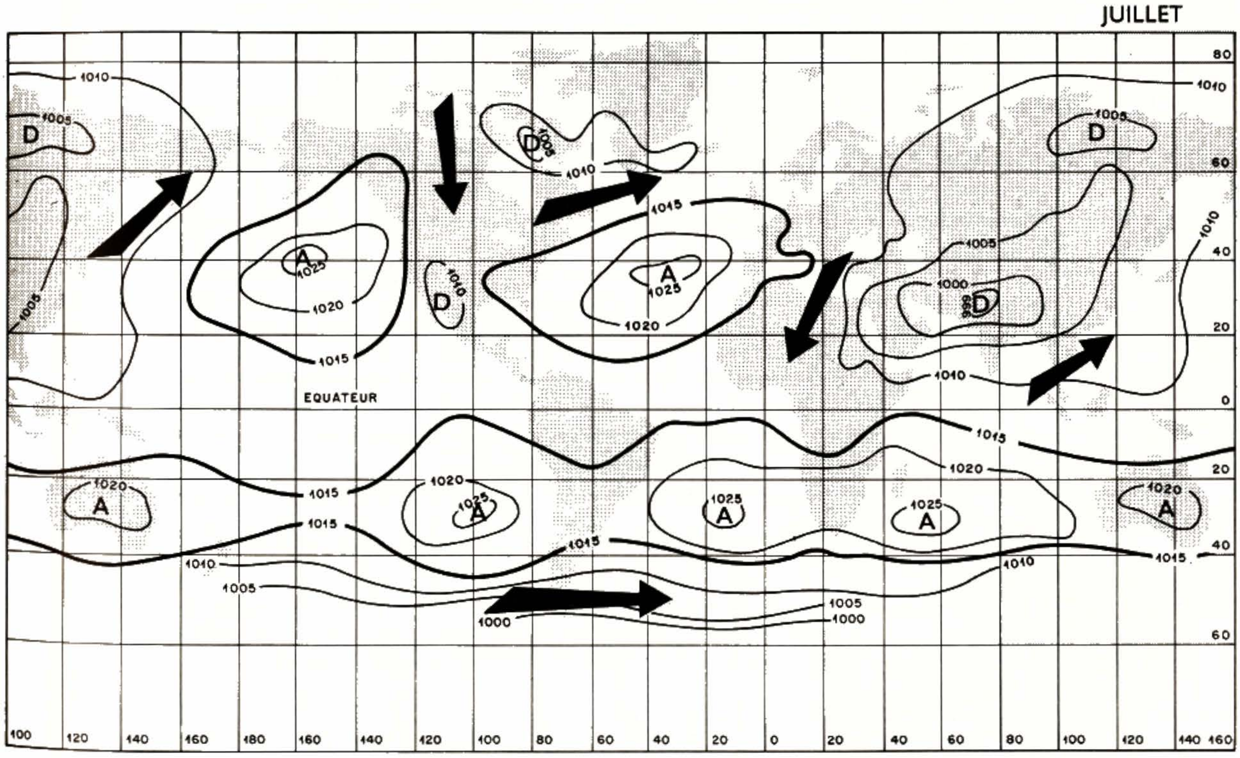


Fig. 3 — Cartes d'isobares moyennes au niveau de la mer et courants de vent associés
(*d'après La météorologie du navigant - Éditions Blondel La Rougery*)

JUILLET



— soit par la tension de vapeur d'eau, exprimée en millibars ;

— soit par la température du point de rosée, exprimée en degrés Celsius ;

— soit par l'humidité relative, exprimée en pourcentages.

Les trois premiers paramètres sont directement liés et restent indépendants de la température, alors que l'humidité relative en dépend fortement.

En effet, l'humidité relative exprime le rapport (pourcentage) entre la quantité maximale de vapeur d'eau que peut contenir l'air humide de température donnée, et la quantité qu'il contient effectivement. Lorsque l'air est saturé, l'humidité est de 100 %, la température du point de rosée est égale à celle de l'air et la tension de vapeur est dite saturante, au même titre que le rapport de mélange. Le tableau, ci-après, exprime ces correspondances pour la pression au sol 1 000 mbar.

Ainsi, à 10 °C (tension de vapeur saturante : 12,3 mbar) si la tension de vapeur mesurée est de 8,2 mbar, l'humidité relative est de 8,2 : 12,3 = 67 %. Le rapport de mélange est

Température (degrés Celsius)	Tension de vapeur saturante (millibars)	Rapport de mélange saturant (g/kg)
— 40	0,13 (glace)	0,1
— 20	1,04 (glace)	0,8
— 10	2,60 (glace)	1,8
— 5	4,02 (glace)	2,6
0	6,11	3,8
+ 5	8,7	5,4
+ 10	12,3	7,8
+ 15	17,0	10,7
+ 20	23,4	14,8
+ 25	31,7	20,2
+ 30	42,4	27,4
+ 35	56,2	37,1

de 7,8 × 0,67 = 5,2 g/kg. La température du point de rosée est un peu inférieure à 5 °C (exactement 4,1 °C) (fig. 4).

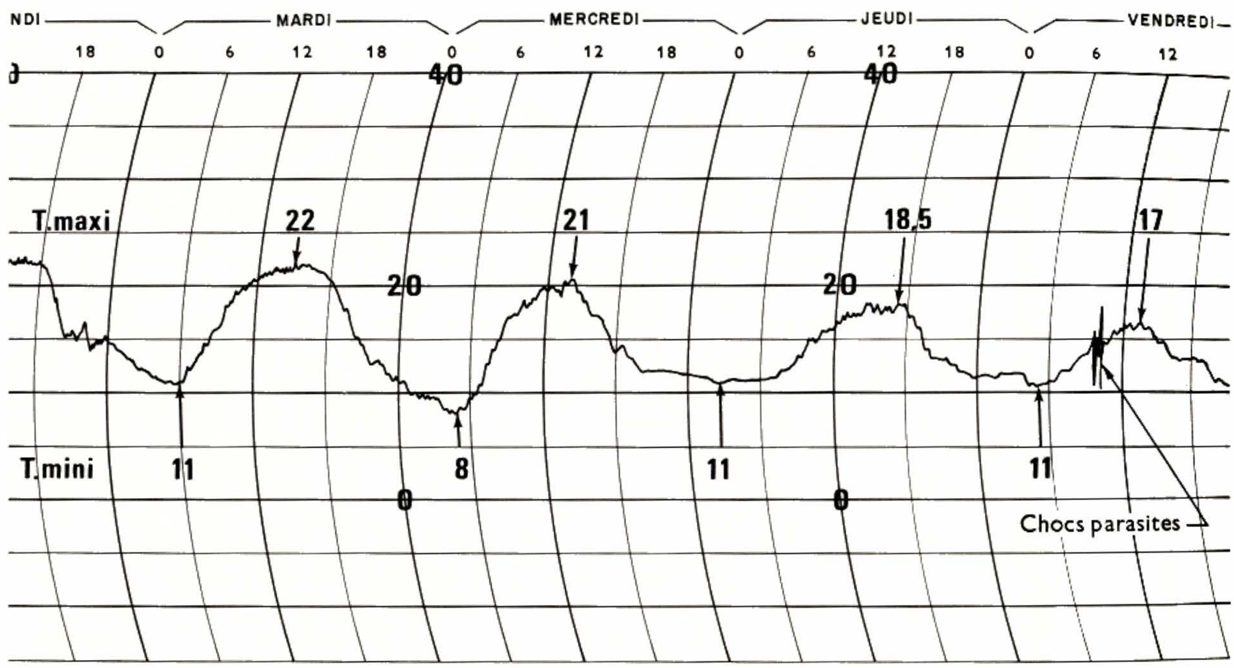
À 20 °C, pour une humidité relative de 50 %, la tension de vapeur est de 11,7 mbar (la moitié de 23,4), le rapport de mélange atteint 7,4 g/kg (la moitié de 14,8) et la température du point de rosée est légèrement inférieure à 10 °C (7,8) : 9,3 °C exactement.

Une variation de température de 1 °C se traduit par une variation relative de la tension de vapeur ou du rapport de mélange d'environ 7 %, en moyenne.

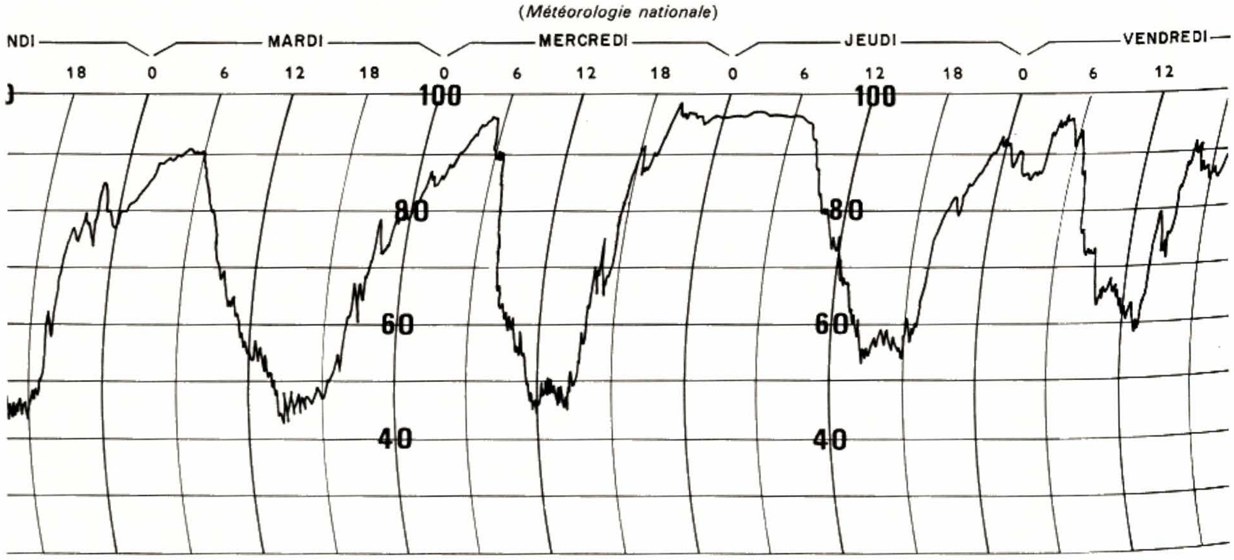
2.3.4. Vent. — Si les trois paramètres précédents caractérisent l'air atmosphérique sous sa forme statique, il convient également de tenir compte de son mouvement : celui-ci se traduit par le vent, défini par un vecteur, c'est-à-dire, pour un instant et un endroit donnés, par un module

Fig. 4 — Exemples d'enregistrements de température et d'humidité

	Mardi		Mercredi		Jeudi		Vendredi	
Heure	6 h	16 h	5 h	14 h	3 h	17 h	5 h	14 h
T_{min} — T_{max}	11 °C	22 °C	8 °C	21 °C	11 °C	18,5 °C	11 °C	17 °C
U_{max} — U_{min}	91 %	43 %	96 %	44 %	97 %	54 %	97 %	59 %



(*Météorologie nationale*)



Échelle Beaufort de la vitesse moyenne du vent (mesurée à 10 m)
Effets du vent sur terre et sur mer (loin des côtes)

Chiffre Beaufort	Terme descriptif	Vitesse moyenne (mètres par seconde)	Effets sur terre	Vitesse moyenne (kilomètre par heure)	Effets au large	Hauteur probable des vagues en mètres (hauteur maximale)
0	Calme	0 - 0,2	Calme ; la fumée s'élève verticalement.	< 1	La mer est comme un miroir.	—
1	Très légère brise	0,3 - 1,5	La direction du vent est révélée par l'entraînement de la fumée.	1 - 5	Il se forme des rides ressemblant à des écailles de poisson, sans aucune écume. Mer dite *calme*.	0,1 (0,1)
2	Légère brise	1,6 - 3,3	Le vent est perçu au visage ; les feuilles frémissent.	6 - 11	Vaguelettes, courtes encore, mais accusées ; leurs crêtes ont une apparence vitreuse, mais elles ne déferlent pas. Mer dite *belle*.	0,2 (0,3)
3	Petite brise	3,4 - 5,4	Feuilles et petites branches constamment agitées ; le vent déploie les drapeaux légers.	12 - 19	Très petites vagues ; les crêtes commencent à déferler ; écume d'aspect vitreux ; parfois quelques moutons épars. Mer dite *peu agitée*.	0,6 (1)
4	Jolie brise	5,5 - 7,9	Le vent soulève la poussière et les feuilles de papier ; les petites branches sont agitées.	20 - 28	Petites vagues devenant assez longues ; moutons relativement nombreux. Mer *agitée*.	1 (1,5)
5	Bonne brise	8,0 - 10,7	Les arbustes en feuilles commencent à se balancer ; de petites vagues avec crêtes se forment sur les eaux intérieures	29 - 38	Vagues modérées prenant une forme nettement allongée ; naissance de nombreux moutons (éventuellement des embruns). Mer *forte*.	2 (2,5)
6	Vent frais	10,8 - 13,8	Les grandes branches sont agitées ; les fils télégraphiques font entendre un sifflement ; l'usage des parapluies est rendu difficile.	39 - 49	Des lames commencent à se former ; les crêtes d'écume blanche sont partout assez étendues ; souvent quelques embruns.	3 (4)
7	Grand frais	13,9 - 17,1	Les arbres sont agités en entier ; la marche contre le vent est pénible.	50 - 61	La mer grossit ; l'écume blanche qui provient des lames déferlantes commence à être soufflée en traînées qui s'orientent dans le lit du vent. Mer dite *très forte*.	4 (5,5)
8	Coup de vent	17,2 - 20,7	Le vent casse des branches ; la marche contre le vent est en général impossible.	62 - 74	Lames de hauteur moyenne et allongées ; du bord supérieur de leurs crêtes commencent à se détacher des tourbillons d'embruns ; l'écume est soufflée, en très nettes traînées, dans le lit du vent. Mer dite *grosse*.	5,5 (7,5)
9	Fort coup de vent	20,8 - 24,4	Le vent occasionne de légers dommages aux habitations (arrachement de tuyaux, de cheminées et d'ardoises).	75 - 88	Grosses lames ; épaisses traînées d'écume dans le lit du vent ; les crêtes des lames commencent à vaciller, s'écrouler et déferler en rouleaux ; les embruns peuvent réduire la visibilité.	7 (10)
10	Tempête	24,5 - 28,4	Rare à l'intérieur des terres ; arbres déracinés ; importants dommages aux habitations.	89 - 102	Très grosses lames à longues crêtes en panache ; l'écume produite s'agglomère en larges bancs et est soufflée dans le lit du vent en épaisses traînées blanches ; dans son ensemble, la surface des eaux semble blanche ; le déferlement en rouleaux devient intense et brutal ; la visibilité est réduite. Mer *très grosse*.	9 (12,5)
11	Violente tempête	28,5 - 32,6	Très rarement observé ; s'accompagne de ravages étendus.	103 - 117	Lames exceptionnellement hautes ; la mer est complètement recouverte de bancs d'écume blanche élongés dans la direction du vent ; partout le bord des crêtes des lames est soufflé et donne de la mousse ; la visibilité est réduite.	11,5 (16)
12	Ouragan	32,7 ou plus	—	118 ou plus	L'air est plein d'écume et d'embruns ; la mer est entièrement blanche du fait des bancs d'écume dérivante ; la visibilité est très fortement réduite. Mer dite *énorme*.	14 (—)

N.B. — Le vent est généralement affecté de variations rapides (turbulence) se traduisant par des rafales dont les vitesses instantanées de pointe dépassent de 20 % (plaines, mer, côtes) à 50 % (voisinage d'agglomération) la vitesse moyenne. Ces écarts relatifs se produisent à l'échelle de la minute, en plus ou en moins, et sont fonction de l'orographie et des obstacles existant dans la direction d'où vient le vent, et aussi de la stabilité de l'atmosphère (heure et saison, type de masse d'air).

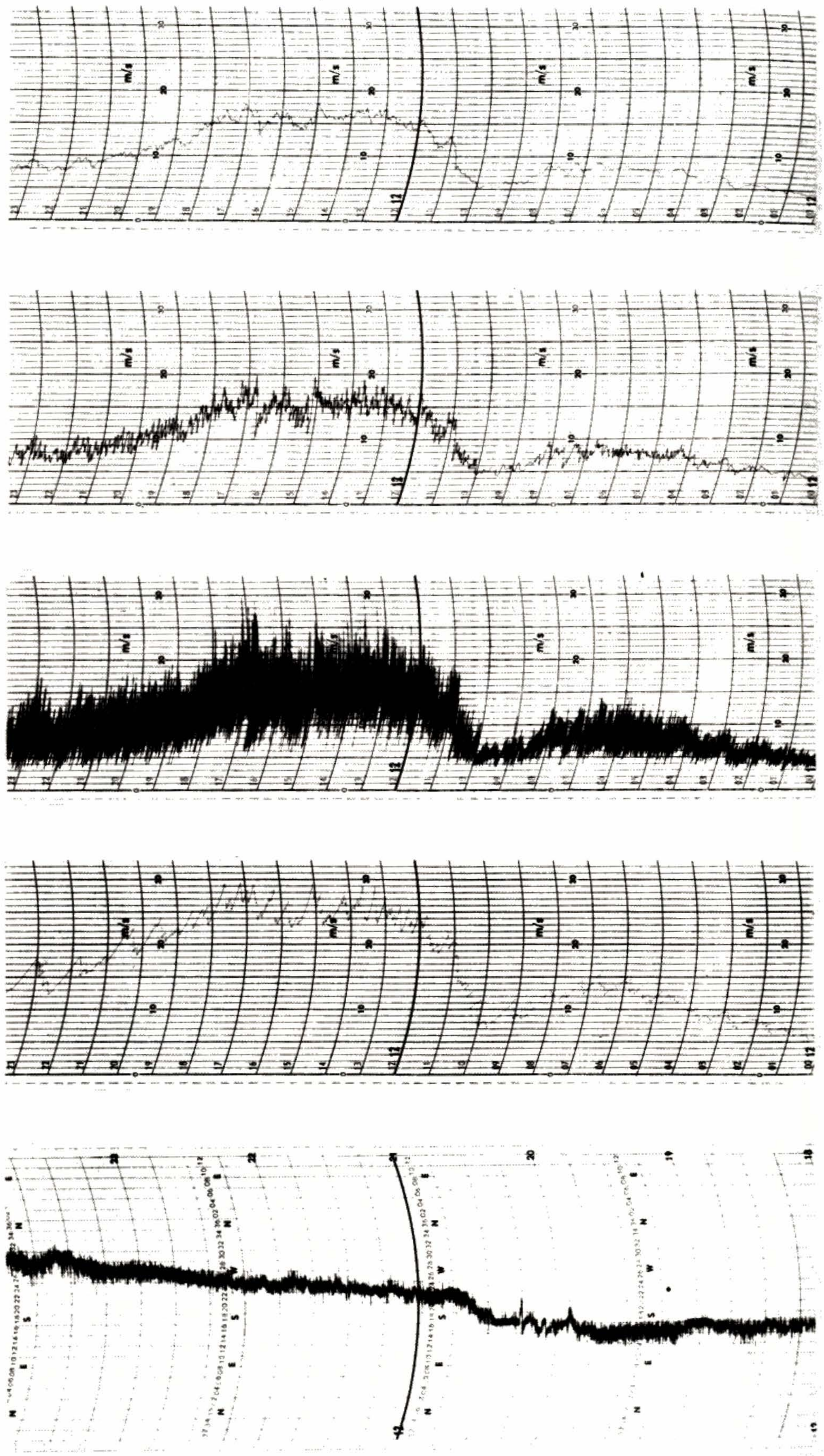


Fig. 5 — Enregistrements de la direction et des vitesses du vent
Girouette à recouvrement et anémomètre fréquence métrique à moulinet plastique à trois coupelles
(hauteur de mesure : 24 mètres)
(*Météorologie nationale*)

ou vitesse du vent (exprimée en mètres par seconde ou en nœuds : 1 kt ≃ 0,5 m/s (1) et par une direction horizontale : celle d'où vient le vent (exprimée en azimut à partir du Nord géographique, parfois complétée d'une faible composante verticale ; fig. 5).

Mais ce vecteur fluctue rapidement pour un endroit déterminé : on caractérise ces variations par la **turbulence.** On peut également définir la vitesse et la direction moyenne durant quelques minutes (en général, au-delà de cinq minutes, l'accroissement de la durée d'intégration change peu le vecteur moyen), et par les valeurs extrêmes durant la même période. En météorologie synoptique, pour laquelle le vent indiqué doit être représentatif d'une vaste surface, on adopte une moyenne sur dix minutes environ, alors que, sur un aérodrome, on utilise de préférence des moyennes sur deux minutes.

Par ailleurs, pour mesurer les rafales, les « pointes » de vent, ce sont les instruments de mesure eux-mêmes, avec leur inertie propre, qui introduisent une certaine intégration, sur une durée voisine de la seconde : on peut ainsi considérer qu'il s'agit bien là, pratiquement, de la vitesse « instantanée » du vent, dont les extrêmes indiquent les rafales.

Dans les basses couches atmosphériques, surtout en fin de nuit lorsque l'air froid stagne au sol, ou dans certaines conditions météorologiques, il peut arriver qu'il existe de fortes variations du vent avec la hauteur : on peut trouver par exemple, aussi bien un vent très faible (calme) au sol et une vitesse de plusieurs mètres par seconde à une altitude de 60 m, qu'un vent assez fort de S.-O. au sol et un vent de vitesse voisine, mais de N.-E., à 60 m de hauteur (V. tableau page 605).

Dans certains cas extrêmes, afin d'assurer la sécurité à l'atterrissage, en particulier pour des avions lourds, on peut ainsi être amené à faire atterrir ces avions « vent dans le dos » pour réduire leur distance d'arrêt, liée principalement à leur vitesse par rapport au sol au moment du contact.

(1) Le nœud est une unité de vitesse anglo-saxonne, autorisée seulement pour les besoins de la navigation, aérienne ou maritime. 1 nœud (1 kt) correspond au parcours d'un mille marin (1 852 m) en 1 heure, soit 0,514 m/s.

2.4. Caractéristiques optiques. — Si l'atmosphère est assimilable à un mélange de gaz, éventuellement en mouvement, il paraît utile de préciser les conséquences optiques de l'absorption et de la diffusion par ces gaz. En se bornant au domaine du rayonnement visible, on peut déjà rappeler que l'*absorption gazeuse* reste limitée : elle se produit faiblement sur d'étroites bandes de longueurs d'onde (vers 0,6 μm). La *diffusion par les molécules* varie de 1 à 10, selon qu'il s'agit des radiations rouges (0,7 μm) ou bleues (0,4 μm) du spectre visible ; cela se traduit respectivement par des transmittances encore égales à 96 % et 70 %, à une distance horizontale de 8 km. En revanche, les *aérosols* variés en suspension dans l'atmosphère sous forme de gouttelettes, de poussières, etc., entraînent une extinction qui devient rapidement indépendante de la longueur d'onde pour des densités optiques suffisantes, liées à des dimensions de particules relativement importantes (plusieurs micromètres de diamètre ; fig. 6). En général, l'absorption reste faible et seule la diffusion intervient. C'est là l'origine de la blancheur lumineuse du brouillard

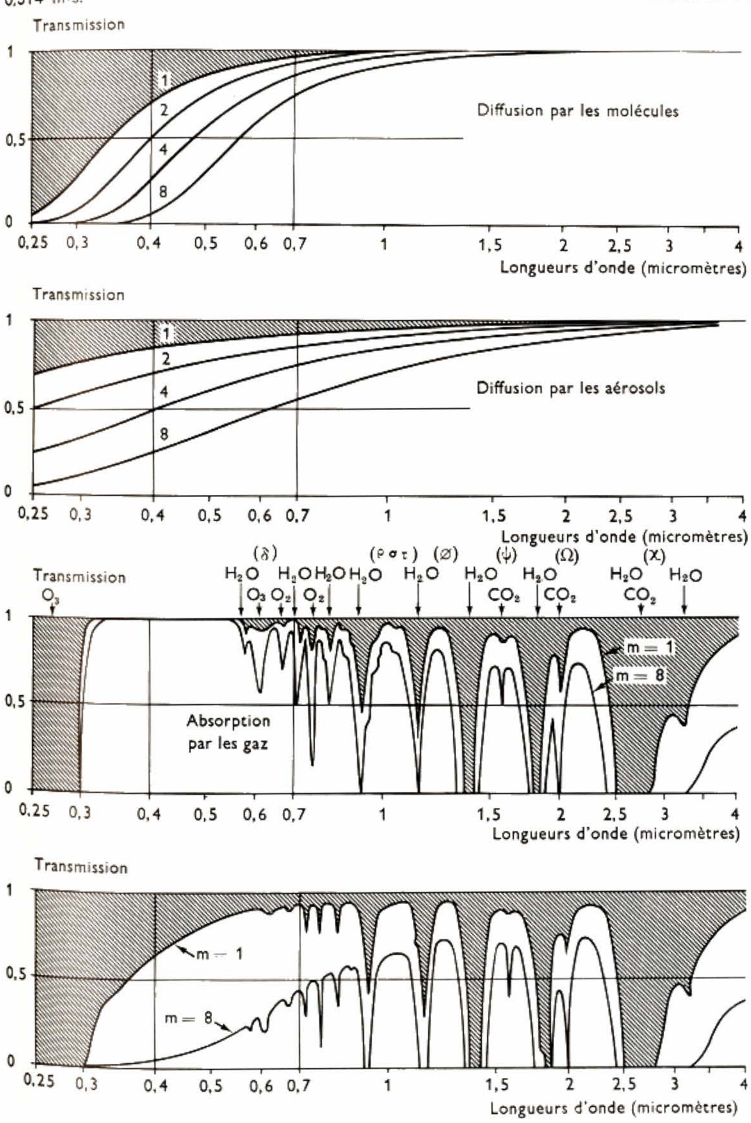


Fig. 6

Les graphiques ci-contre précisent les valeurs de l'extinction optique due à l'atmosphère, pour les longueurs d'onde comprises entre 0,25 et 4 μm (rayonnement solaire) :
— diffusion par les molécules
— diffusion par les aérosols
— absorption par les gaz
— transmission finale pour les masses d'air traversées indiquées par les cotes des courbes :

m = 1 : trajet vertical (soleil au zénith)
m = 2 : trajet oblique (hauteur : 30°)
m = 4 : trajet oblique (hauteur : 15°)
m = 8 : trajet oblique (hauteur : 7°)

Il s'agit là d'une atmosphère moyenne, relativement pure et peu humide. Rappelons que le rayonnement visible s'étend entre 0,4 μm (violet) et 0,7 μm (rouge sombre) (*A.F.E.D.E.S.*)

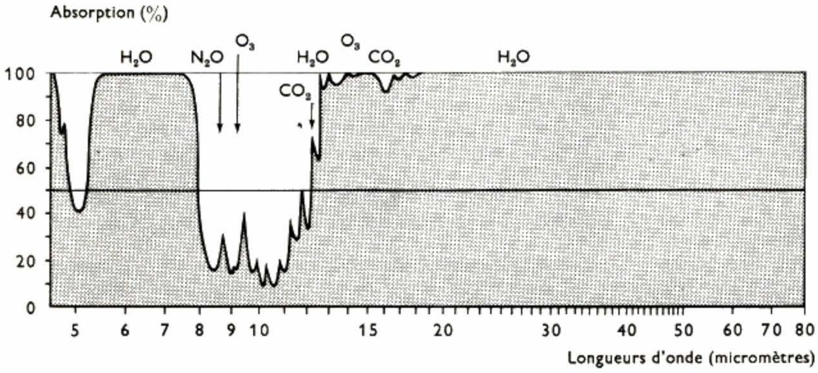


Fig. 7 — Absorption par les gaz atmosphériques des rayonnements infrarouges compris entre 5 et 80 μm (l'atmosphère envisagée est relativement peu humide, claire et pure et il s'agit d'un trajet vertical dans toute son épaisseur (*A.F.E.D.E.S.*)

éclairé par le soleil, contrastant avec le fond bleu d'un ciel diffusant principalement les faibles longueurs d'onde du rayonnement solaire (fig. 7).

Pratiquement, cette extinction peut se traduire en termes de distance de *visibilité* d'un objet noir de dimensions suffisantes (visibilité météorologique), depuis 100 km jusqu'à 1 000 m (brouillard) et même 100 m, en atteignant exceptionnellement 25 mètres. De cette visibilité météorologique on peut déduire la distance maximale à laquelle seraient vues diverses sources lumineuses, sous réserve de tenir compte de leurs intensités et de la luminance de l'horizon (jour ou nuit) ; pour les balises lumineuses jalonnant une piste d'aérodrome, le facteur de multiplication qui doit être appliqué à la visibilité météorologique varie de 2 à 3 le jour, et de 3 à 5 la nuit, les valeurs les plus fortes de ce facteur étant notées pour les plus faibles visibilités, mais cela toujours dans les cas de brouillards.

Les gouttelettes formant les nuages produisent le même effet, au même titre que les fortes pluies, la neige, les nuages de poussière. La brume de sable (provoquée par des cristaux dont une orientation préférentielle est dictée par leur chute lente) mais aussi certains brouillards de glace peuvent introduire par ailleurs des phénomènes de réflexion rendant la visibilité oblique parfois très inférieure tant à la visibilité horizontale au sol que même à la visibilité selon une verticale : il y a là une source de surprises et d'accidents souvent méconnue.

2.5. Phénomènes divers. — Bien entendu, on pourrait définir les caractéristiques électriques et bien d'autres propriétés physiques de l'atmosphère dans les basses couches : en se bornant aux principaux problèmes liés au décollage et à l'atterrissage des véhicules aérospatiaux on a déjà examiné plusieurs aspects que l'on retrouvera à des altitudes plus élevées, complétés d'autres caractéristiques qui deviennent alors relativement plus importantes.

On ne peut cependant passer sur les diverses formes de précipitations, liquides ou solides : bruine, pluie, neige, grésil, grêle, etc., sans signaler leurs incidences directes sur la nébulosité et, parfois, sur le givrage. Ce nouvel aspect sera détaillé au chapitre suivant.

3. LA TROPOSPHÈRE

Il s'agit là de la couche d'atmosphère la plus utilisée par les avions classiques ; elle s'étend jusqu'à la stratosphère, c'est-à-dire en moyenne jusqu'à 11 000 m d'altitude pour nos régions. Le niveau de la *tropopause* (couche mince de séparation entre la troposphère et la stratosphère) peut en fait osciller assez fortement, surtout en climat tempéré, par exemple entre 6 000 m pour l'air d'origine polaire et 15 000 m pour l'air d'origine équatoriale, par suite des mouvements horizontaux et verticaux dus à la circulation générale et selon les caractéristiques physiques (principalement pression et température) des couches atmosphériques supérieures et inférieures.

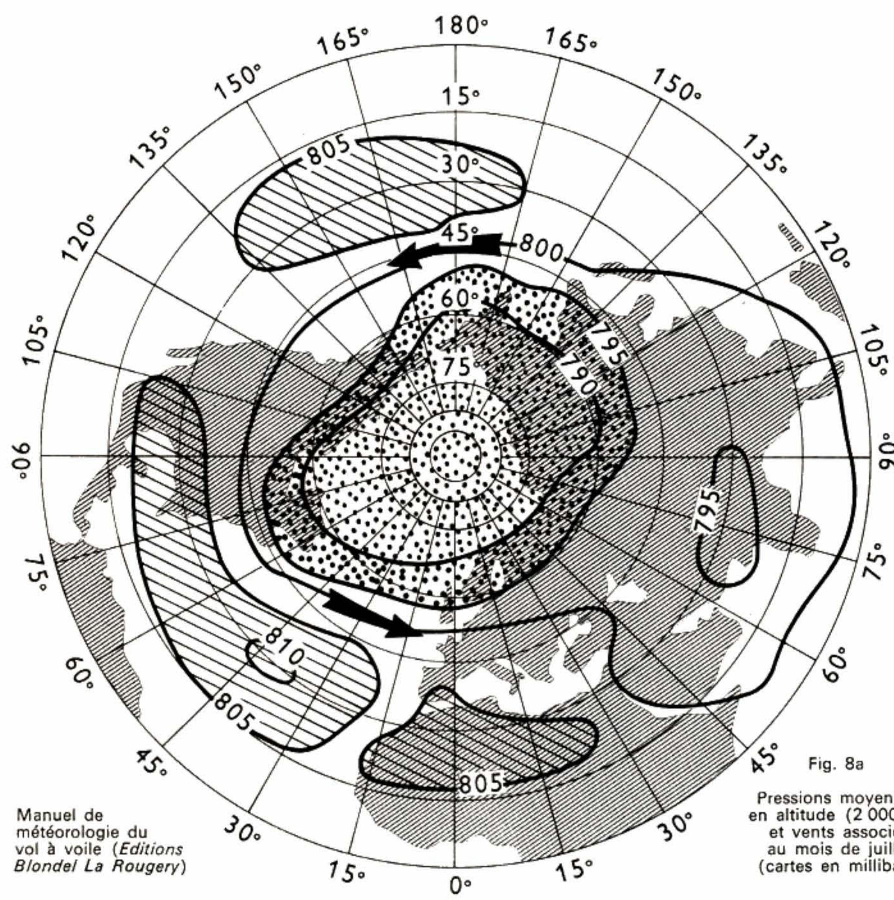


Fig. 8a

Pressions moyennes en altitude (2 000 m) et vents associés au mois de juillet (cartes en millibars)

Manuel de météorologie du vol à voile (*Editions Blondel La Rougery*)

En règle générale, lorsque l'altitude croît, la composition chimique de l'air sec reste inchangée, mais la teneur en eau de l'atmosphère diminue très rapidement alors que la concentration en ozone s'accroît assez régulièrement. Dans ce chapitre, on traitera particulièrement des variations normales relevées pour les principaux paramètres météorologiques, mais aussi des causes et conséquences des perturbations engendrées par les mouvements horizontaux ou verticaux, dont la pluie et les orages restent parmi les manifestations importantes.

3.1. Variation des paramètres météorologiques. — On ne considérera ici que la pression, la température et la teneur en vapeur d'eau (fig. 8 a et b).

3.1.1. Pression. — Comme déjà indiqué au paragraphe 2.3.2, la pression atmosphérique diminue avec l'altitude ; la relation

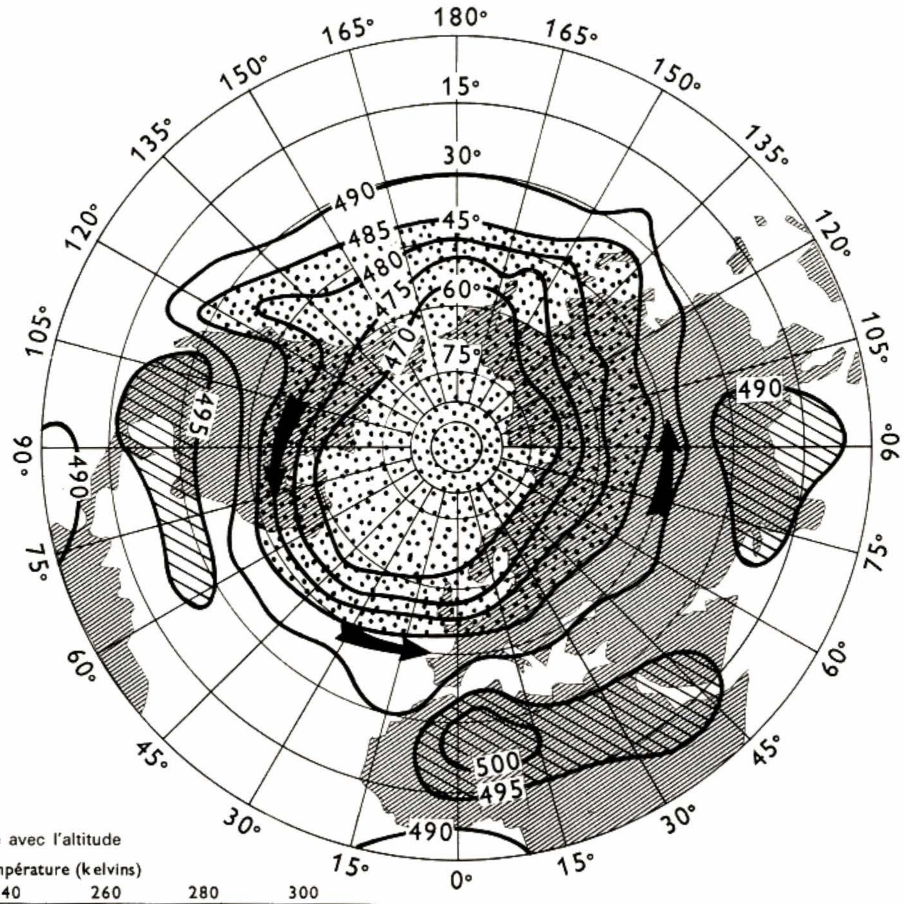
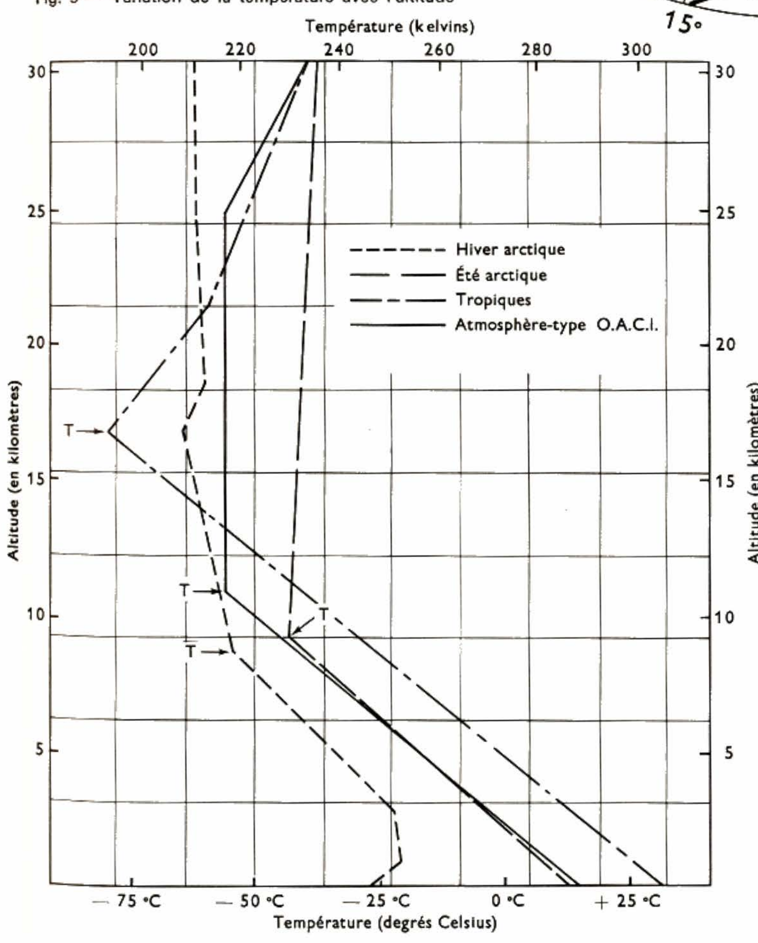


Fig. 8 b

Pressions moyennes en altitude (6 000 m) et vents associés au mois de juillet (cotes en millibars)

Fig. 9 — Variation de la température avec l'altitude



qui lie ces deux grandeurs est pratiquement identique pour l'atmosphère libre et pour le sol des régions montagneuses. Il convient seulement ici d'ajouter les quelques équivalences suivantes : une différence de pression de 10 mbar correspond à une différence de hauteur qui, au voisinage du niveau de la mer, et selon la température moyenne de la couche considérée, est d'environ 80 à 100 m ; cette différence de hauteur atteint 150 à 200 m vers 5 000 m d'altitude, pour devenir égale à environ 1 000 m vers 15 000 m d'altitude, où la pression atmosphérique n'est plus que de 100 mbar, soit le dixième de la pression au sol.

Pratiquement, l'air atmosphérique, contenu dans la couche comprise entre le sol et 5 000 m, représente la moitié de la masse totale de l'atmosphère, soit 50 % ; ce rapport passe à 90 % entre le sol et 15 000 m et à 99 % entre le sol et 30 000 m.

3.1.2. Température. — En règle générale, dans la basse atmosphère, la température décroît régulièrement lorsque l'altitude augmente : c'est là la définition même de la troposphère, où l'on trouve en moyenne un gradient vertical proche de 0,65 °C par 100 m (fig. 9).

Comme pour les températures au sol, les températures de l'atmosphère à un niveau déterminé peuvent varier sensi-

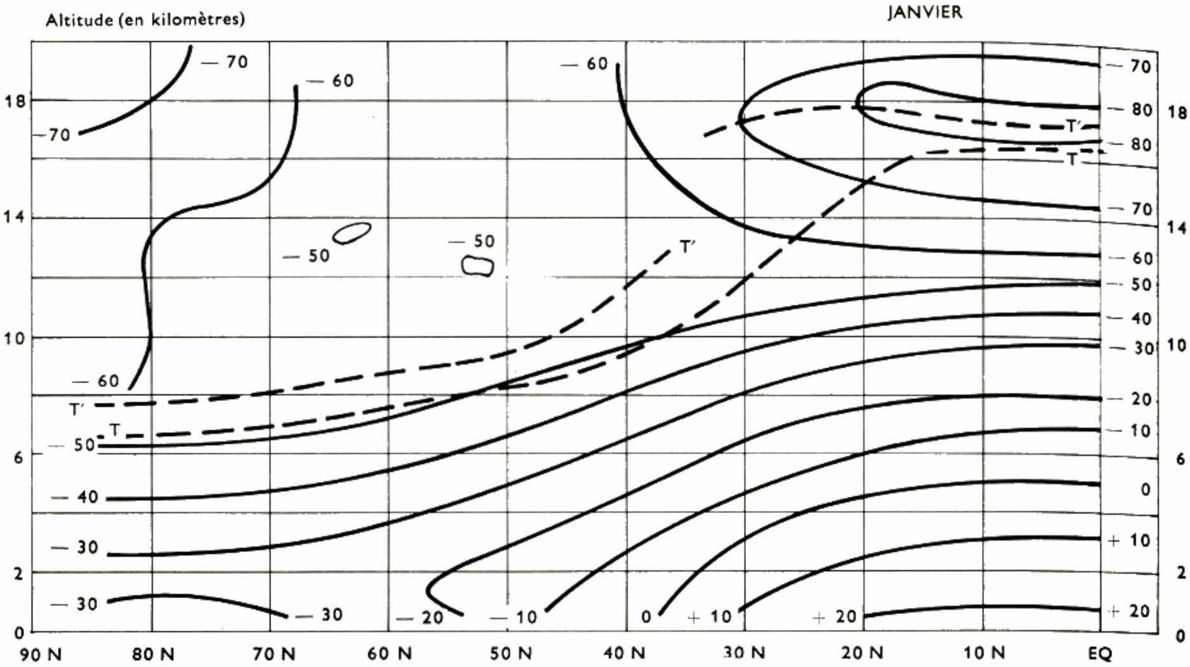
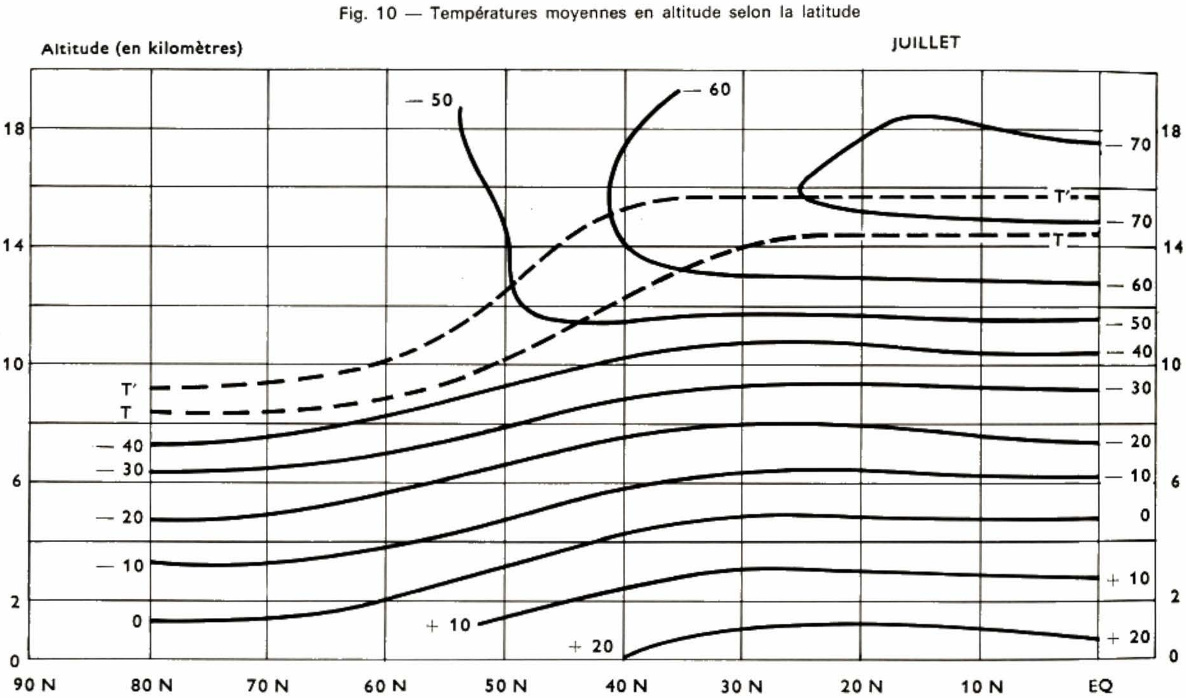


Fig. 10 — Températures moyennes en altitude selon la latitude



blement autour de leurs valeurs moyennes annuelles, et cela en fonction tant du climat que de la saison et des conditions météorologiques. Vers 5 000 m, par exemple, des écarts de l'ordre de ± 15 °C autour de la moyenne de nos régions (— 15 °C à 5 000 m) restent fréquents.

Par ailleurs, il apparaît nécessaire de préciser les valeurs moyennes de ces températures selon les latitudes et les saisons : la figure 10 fait nettement ressortir les principaux traits caractéristiques de la troposphère tropicale et de la troposphère polaire. Dans les 10 000 premiers mètres, l'air équatorial est plus chaud que l'air polaire, mais au-delà, alors qu'un léger réchauffement se marque dans la stratosphère polaire, le refroidissement se poursuit dans l'air équatorial. Finalement, les températures les plus basses sont relevées dans les régions intertropicales (— 80 °C vers 17 km), alors qu'on ne descend guère à des températures inférieures à — 40 °C dans l'air polaire (vers 9 km, par exemple).

Lorsque de telles atmosphères différenciées arrivent au contact, par le jeu des vents résultant du champ de pressions, ces écarts de température (généralement couplés à des différences de teneur en eau) provoquent la formation de nuages de mélange, que des phénomènes d'advection et de convection forcée peuvent développer : on en parlera à propos des « fronts » (V. § 3.2.2).

Par ailleurs, la thermoconvection doit être ici abordée : lorsque l'air des basses couches est réchauffé fortement au contact du sol, il a tendance à s'élever mais un changement d'altitude se traduit par une diminution de pression, par une détente, et ainsi par un refroidissement. Pour de l'air sec, le taux naturel de refroidissement est voisin de — 1 °C pour 100 m d'élévation. Pour de l'air humide, au sein duquel la vapeur d'eau est appelée à se condenser sous forme de gouttelettes, le taux naturel de refroidissement est évidemment moins fort : de 0,3 à 0,9 °C par 100 m selon l'altitude mais surtout selon la teneur en eau à la saturation, c'est-à-dire selon la température du point de rosée.

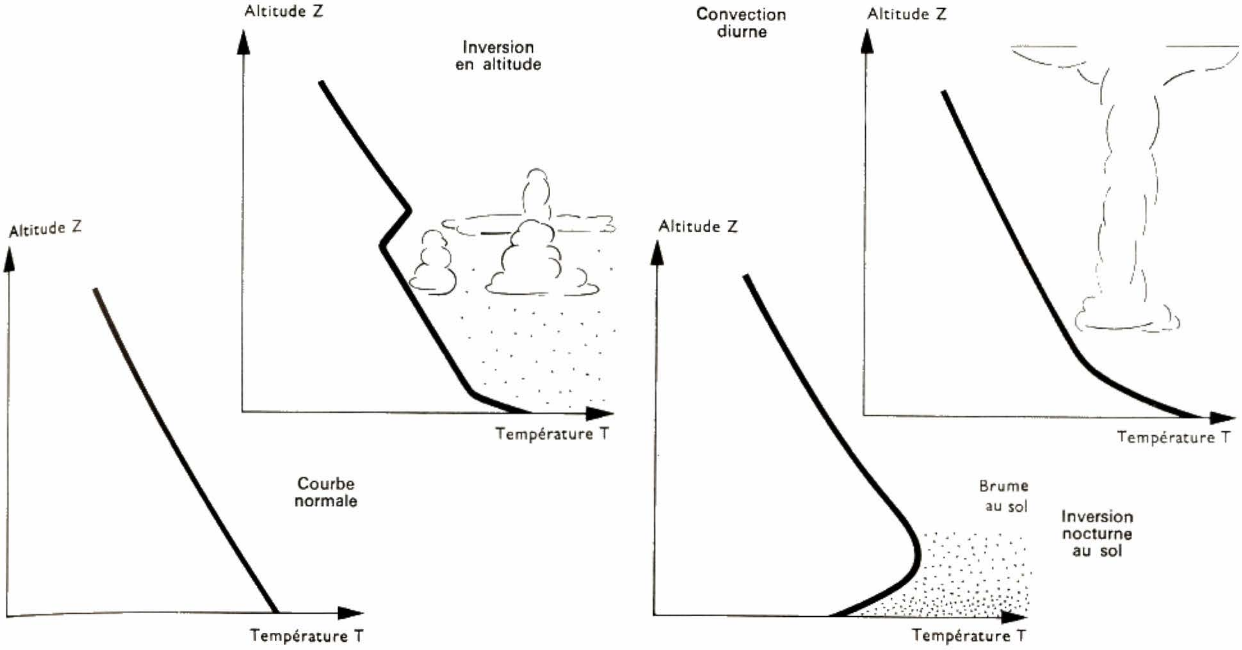


Fig. 11 — Formes particulières de la courbe température-altitude

Lorsque, par ce refroidissement lié à la convection, la température de l'air atteint celle où la tension de vapeur d'eau devient saturante, la condensation intervient : un léger refroidissement supplémentaire se traduit par la condensation de la vapeur d'eau, sous forme liquide sur des aérosols, ou directement sous forme solide sur des germes cristallins, selon la température atteinte. C'est là le mécanisme de formation de la plupart des nuages, y compris les nuages liés aux « fronts » par ascendance forcée, mais surtout des nuages convectifs comme les cumulus et les cumulonimbus générateurs d'orages (V. § 3.2.3).

Par ailleurs, lorsque le sol (ou certaines couches nuageuses) se refroidissent lentement la nuit, il en est de même de l'air à son contact qui, de par sa masse volumique relativement grande, a ainsi tendance à s'accumuler au sol : c'est là l'origine des brises de mer ou de montagne mais aussi l'explication de la formation des brouillards de rayonnement par nuit sans vent. Lorsque ce phénomène se produit en altitude (couche isotherme ou se réchauffant avec l'altitude), on a affaire à une « inversion » : les courants ascendants thermoconvectifs sont alors ralentis, ou même bloqués, par cette inversion et la pollution s'accumule sous cette couche. Le niveau correspondant est souvent très nettement visible d'avion : au-dessus d'une limite extrêmement marquée, la brume au sol fait place à un beau ciel bleu et pur et les nuages ne peuvent qu'émerger quelques minutes dans cette couche, en étant rapidement décapités et dissous (fig. 11).

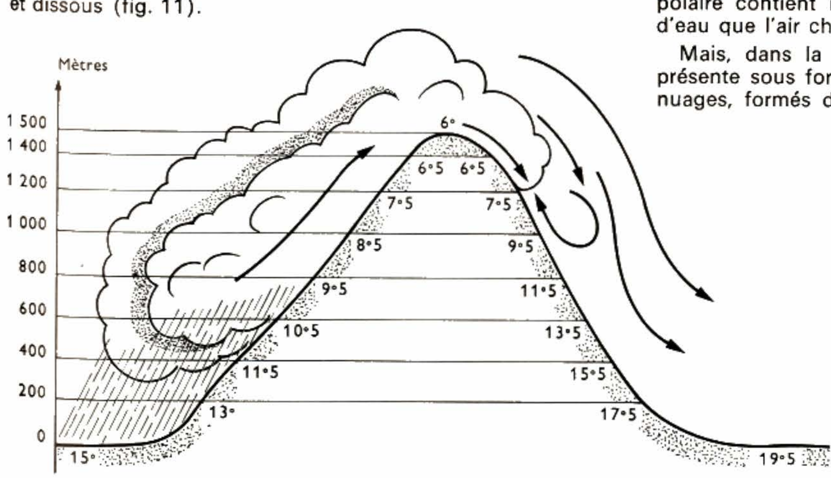


Fig. 12

Effet de fœhn au passage d'une montagne

On notera aussi l'importance, pour de nombreux besoins aérospatiaux, de l'altitude des isothermes 0 °C et — 10 °C : c'est vers ces niveaux que le givrage se produit le plus facilement, surtout vers — 10 °C ; l'isotherme 0 °C indique l'altitude au-dessous de laquelle l'eau ne peut plus exister à l'état solide (cristaux de neige ou de glace).

3.1.3. Teneur en eau. — La teneur maximale en vapeur d'eau de l'air est exclusivement fonction de sa température. La décroissance régulière de la température avec l'altitude entraîne une diminution très rapide de ce contenu maximal en vapeur d'eau et, ainsi, de la teneur réelle.

On peut estimer que la couche comprise entre le sol et 2 000 m de hauteur contient environ la moitié de la vapeur d'eau atmosphérique et que 95 % se trouvent au-dessous de 5 000 m.

Selon les origines et les transformations subies par une masse d'air donnée, celle-ci peut être plus ou moins humide : par exemple, l'air d'origine continentale est relativement sec devant l'air d'origine océanique, surtout si des ascendances orographiques forcées (passage d'une chaîne montagneuse) l'ont obligé à éliminer, sous forme de pluie, l'eau qu'il contenait (effet de fœhn ; fig. 12), en accroissant par ailleurs sa température par augmentation de la pression de l'air dans son mouvement descendant (subsidence de l'air sec). De même, l'air froid d'origine polaire contient initialement beaucoup moins de vapeur d'eau que l'air chaud d'origine tropicale.

Mais, dans la troposphère, l'eau n'est pas seulement présente sous forme de vapeur : elle se manifeste par les nuages, formés de gouttelettes ou de cristaux de glace,

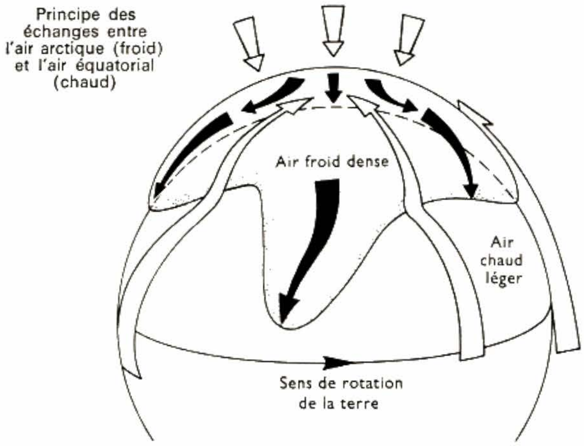
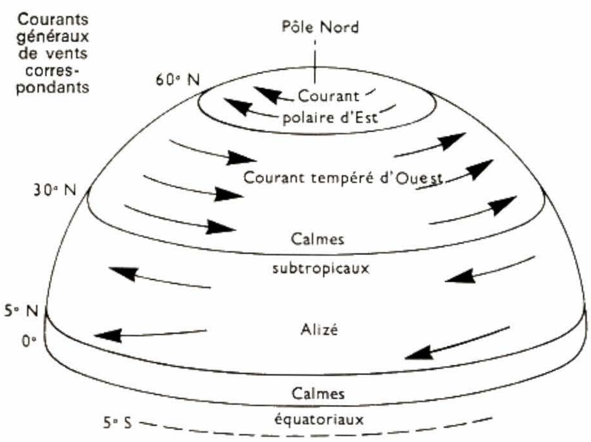


Fig. 13 — Schémas de la circulation générale de l'atmosphère



et aussi par les précipitations qui en proviennent : pluie, neige, grésil ou grêle, selon la rapidité, les niveaux et les mécanismes des condensations qui les provoquent. Il faut cependant noter que le contenu de l'atmosphère en eau liquide, au sein des nuages, est normalement inférieur à son contenu en vapeur d'eau : à 2 500 m, par exemple, dans nos régions, la température moyenne voisine de 0 °C correspond à la saturation pour environ 5 grammes de vapeur d'eau par mètre cube, alors que le contenu en eau liquide des nuages moyens reste généralement proche de 1 gramme par mètre cube. Cependant, dans le cas de nuages épais et denses, surtout d'origine convective, la forte alimentation en vapeur d'eau, couplée à une extrême efficacité des processus de condensation, peut conduire à un rapport assez différent et entraîner des précipitations dont l'intensité locale peut atteindre ou dépasser 2 mm de pluie par minute.

On n'insistera pas autrement sur ces phénomènes, dont les incidences directes sur les caractéristiques du milieu n'intéressent guère les techniques aérospatiales : le givre et la grêle seront étudiés ultérieurement et on se bornera à signaler que la visibilité au sein d'une masse nuageuse stable, est directement liée à son contenu en eau liquide et à la répartition des dimensions des gouttelettes qui la constituent. Il en est de même pour la visibilité dans une zone pluvieuse ou neigeuse.

3.2. La circulation générale. — Au sein de la troposphère, les différentes masses d'air sont animées de mouvements propres (se traduisant par le vent) qui entrainent leur déplacement, leur déformation, leur évolution. Or, ces mouvements sont principalement dirigés par le champ des pressions à chaque niveau et peuvent être considérés, en première approximation, comme horizontaux bien que non homogènes dans toute l'épaisseur de la troposphère.

L'existence de couches voisines animées de déplacements différents provoque la formation de turbulence et les mouvements verticaux sont engendrés par la convection, thermique ou forcée : ces phénomènes secondaires seront analysés au paragraphe 3.4 (fig. 13).

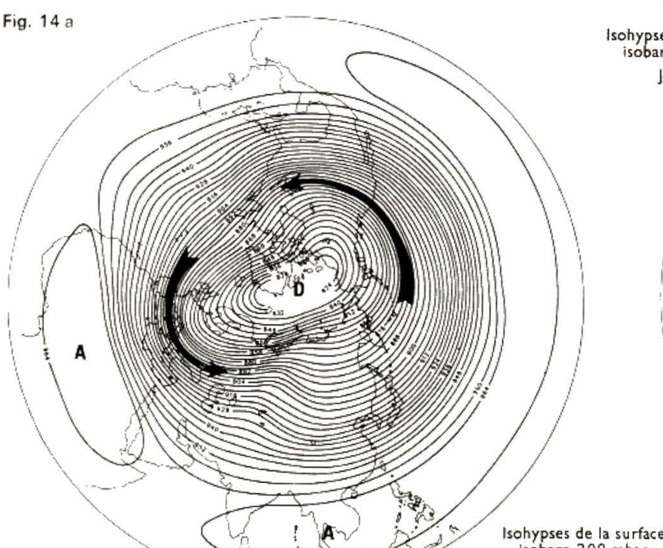
3.2.1. Le champ de pressions. — Il est relativement aisé, aussi bien au niveau de la mer qu'à une altitude déterminée, de tracer la carte des pressions à ce niveau : on y découvre immédiatement des zones de hautes pressions (anticyclones) et des zones de basses pressions (dépressions), séparées par des lignes isobariques dont la courbure et le gradient déterminent le vent à ce même niveau (fig. 14 a et b).

Dans l'hémisphère Nord, les vents tournent dans le sens des aiguilles d'une montre autour des anticyclones, et dans le sens inverse (sens trigonométrique) autour des dépressions. Dans l'hémisphère Sud, c'est le contraire (loi de Buys Ballot, qui traduit l'effet des forces de Coriolis dû à la rotation de la Terre sur elle-même).

Bien entendu, une étude complète doit faire intervenir les forces horizontales de pression tendant à diriger l'air vers les basses pressions, mais aussi les forces dues au frottement et à la rugosité du sol (V. § 3.3). On peut ainsi prévoir les mouvements de l'atmosphère à chaque niveau, sous réserve d'estimer également son évolution (variations de température, de densité, de contenu en eau et des diverses formes d'énergie).

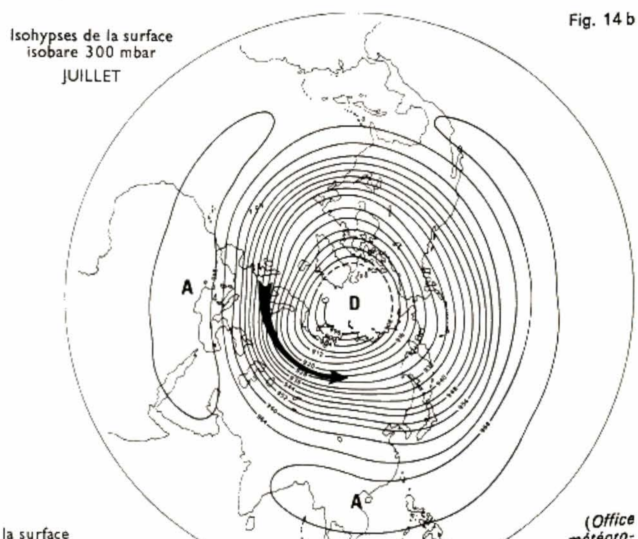
Pratiquement, pour les données en altitude, les cartes de pressions à un niveau déterminé sont le plus souvent remplacées par les cartes des altitudes correspondant à une

Fig. 14 a

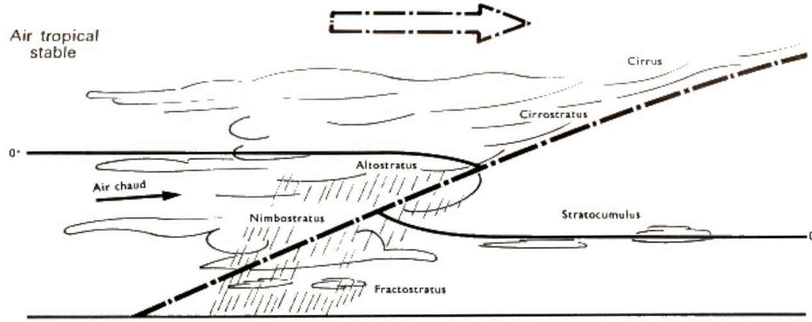


Isohypses de la surface isobare 200 mbar
JANVIER

Fig. 14 b



(Office météorologique de Grande-Bretagne)



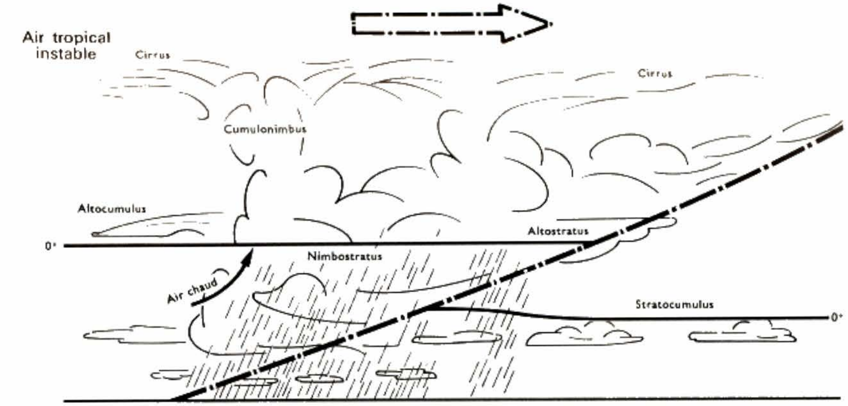
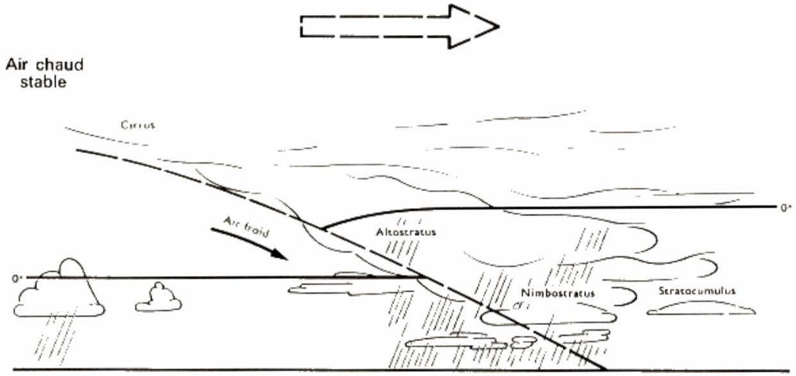


Fig. 15

Fronts chauds



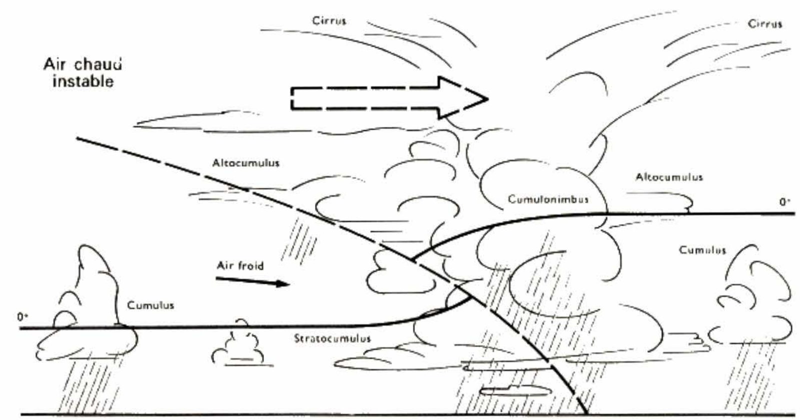
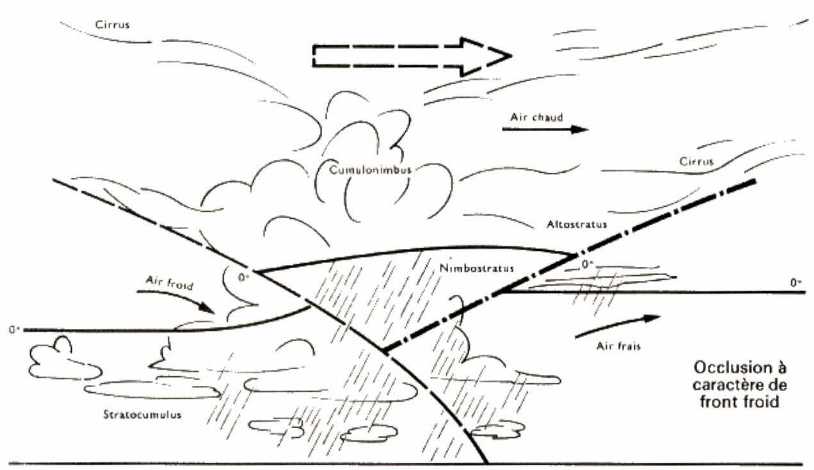


Fig. 16

Fronts froids



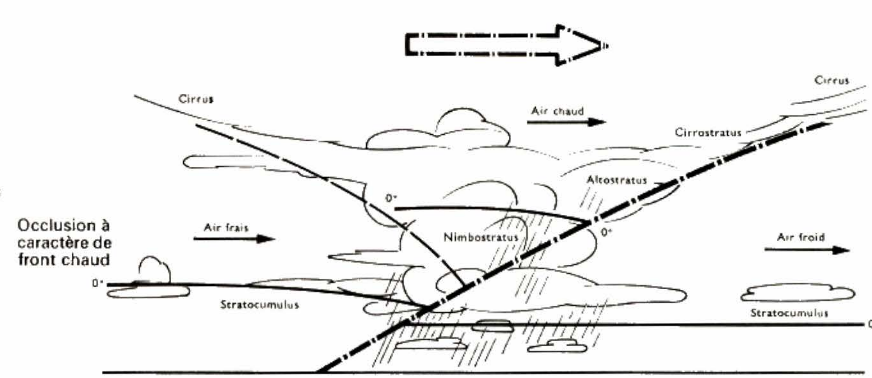


Fig. 17

Occlusions

pression déterminée : 500 mbar, 300 mbar, 100 mbar, par exemple, et par des cartes d'isohypses donnant la différence d'altitude entre deux niveaux de pression différents. Il existe évidemment une bonne coïncidence entre ces deux types de représentations, dont les usages sont identiques. Mais l'importance de la température moyenne des couches apparaît de manière plus directe sur les cartes d'isohypses et explicitent mieux les déformations du champ de pression avec l'altitude : un centre anticyclonique se déplace ainsi vers « le chaud », en altitude, et une dépression se décale vers le « froid ». On montre aussi que les vents d'Ouest croissent en moyenne avec l'altitude, dans la troposphère.

3.2.2. Les fronts. — Par suite de ces champs de vents différents selon les niveaux, mais aussi à cause de l'existence de zones de convergence, des masses d'air de caractéristiques différentes peuvent se rencontrer, s'opposer, se superposer, se différencier ou se fondre (V. fig. 15, 16 et 17).

Dépendant de phénomènes thermiques se produisant surtout dans les basses couches et de phénomènes de convergence ou de divergence, surtout marqués en altitude, l'évolution des caractéristiques d'une masse d'air détermine son état à un moment et à un lieu précis, compte tenu de son origine (arctique, polaire, tropicale ou équatoriale) et de ses trajets antérieurs, principalement maritimes ou continentaux. Si des mécanismes engendrent le contact de masses d'air différenciées, il y a normalement formation de « fronts », de surfaces frontales séparant ces masses d'air.

Généralement, la surface frontale n'est pas verticale, mais présente une certaine pente, l'air chaud surmontant l'air froid. Selon le sens du déplacement de cette surface frontale, on peut avoir affaire à un front chaud (pente voisine de 1/500) ou à un front froid (pente proche de 1/50) ; la vitesse de déplacement du front peut varier dans de larges limites : atteindre, par exemple, 50 km/h ou être pratiquement nulle (front quasi stationnaire).

Il arrive également que deux masses d'air relativement froid rejettent en altitude une troisième masse d'air plus chaud : il s'agit alors d'une occlusion ayant le caractère d'un front froid ou chaud.

On notera la cassure habituelle des isobares au passage du front, liée à une rotation de la direction du vent, et souvent accompagnée d'une discontinuité de vitesse.

Les fronts se regroupent fréquemment en famille de perturbations et déterminent la formation de systèmes nuageux (fig. 18).



Cirrus (*Météorologie nationale*)

ment situé vers la latitude 45 °N et au niveau de pression 300 mbar (9 000 m). Dans l'axe de ce jet, le vent dépasse souvent 150 km/h (75 kt environ) sur de très longues distances (V. fig. 19 a et b).

3.2.4. Les cyclones. — Affectant l'allure d'une dépression circulaire isolée, dont le diamètre atteint quelques centaines de kilomètres, les cyclones se forment dans la bande intertropicale et se développent en fonction de facteurs encore mal connus (température de la mer, confluence de masses d'air différenciées, etc.).

La pression au centre peut atteindre 900 mbar au niveau de la mer, et les vitesses des vents peuvent dépasser 200 km/h (100 kt environ) ; les cyclones sont généralement accompagnés de pluies torrentielles et se déplacent assez

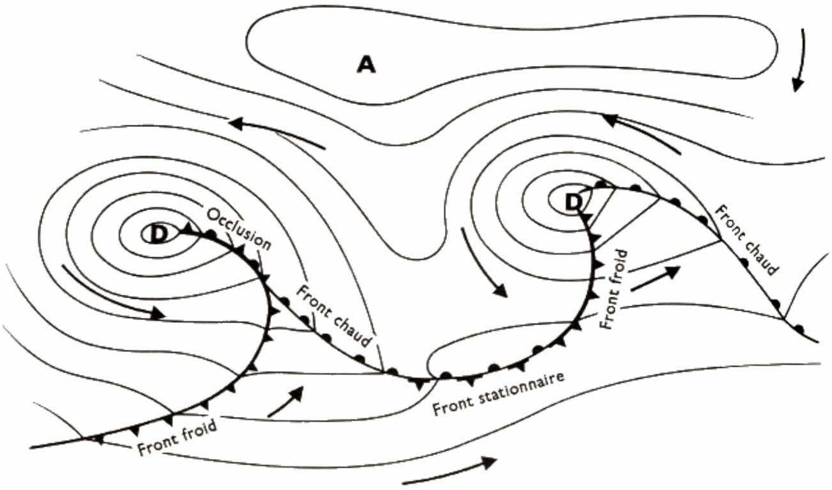


Fig. 18

Schéma d'une famille de perturbations

3.2.3. Le courant-jet (*jet-stream*). — La structure thermique de la troposphère implique un renforcement des vents d'Ouest en altitude, avec son maximum immédiatement au-dessous de la tropopause.

Par suite des contrastes existant au voisinage du front polaire, cet effet est renforcé et se traduit par la création d'un très fort courant d'Ouest : le « jet-stream », générale-

lentement d'Est en Ouest, à des vitesses irrégulières liées à leur intensité ; ils tendent à s'écarter de l'équateur. Leur repérage est actuellement très facilité par les photographies transmises des satellites artificiels, et les radars terrestres permettent de les explorer et de connaître leur structure avec précision.

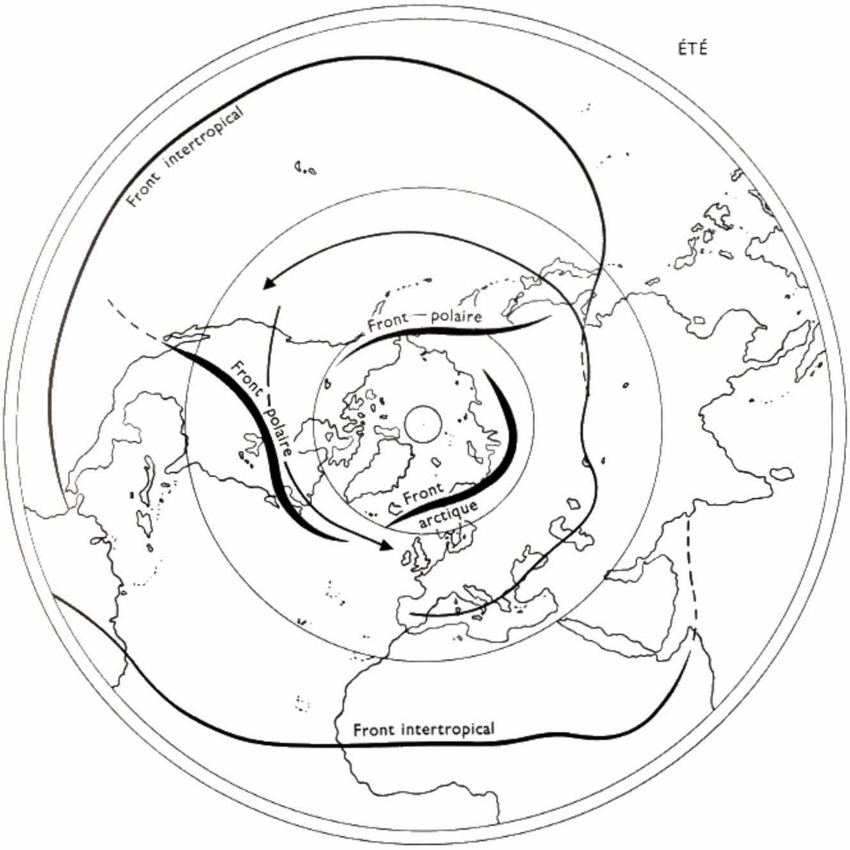


Fig. 19 a

Position moyenne des principaux fronts et des courants-jets

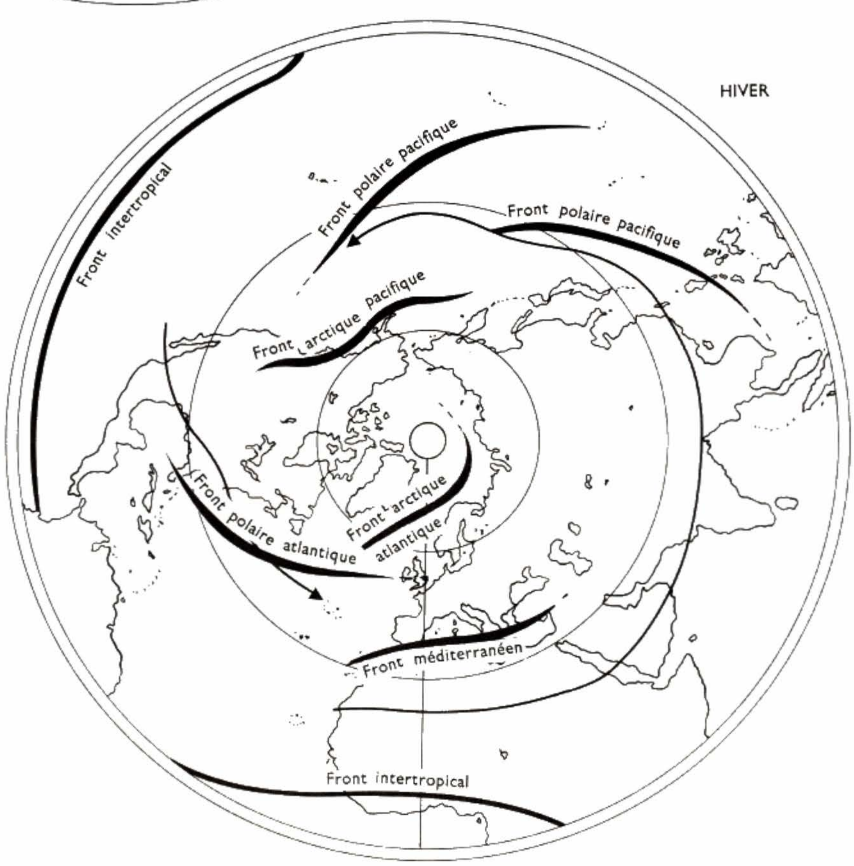


Fig. 19 b



Cumulonimbus (*Météorologie nationale*)

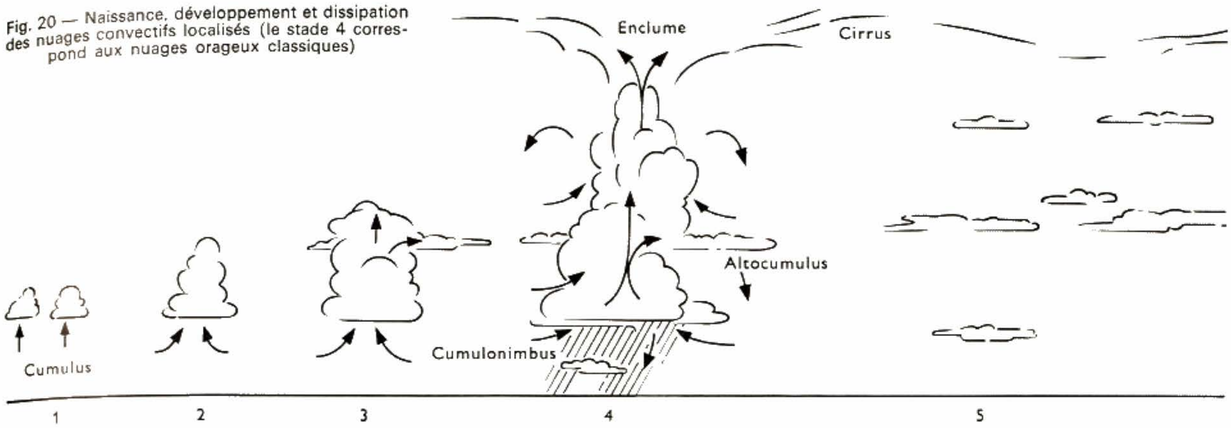


Cumulus et cirrus au second plan (*Météorologie nationale*)

3.3. Les mouvements convectifs. — En plus de ces vastes déplacements horizontaux au sein de la pellicule atmosphérique se produisent des mouvements verticaux dans l'épaisseur de celle-ci. De moindres dimensions, ils correspondent cependant à la mise en jeu de fortes énergies et se traduisent par des phénomènes météorologiques parfois brutaux, qui sont très généralement à l'origine des nuages et des précipitations.

3.3.1. Stabilité et instabilité. — Comme on l'a déjà signalé, lorsqu'une particule d'air change d'altitude, sa température varie plus ou moins rapidement selon que l'eau

Fig. 20 — Naissance, développement et dissipation des nuages convectifs localisés (le stade 4 correspond aux nuages orageux classiques)



reste à l'état de vapeur ou se condense en libérant de la chaleur. Par ailleurs, la poussée d'Archimède communique un mouvement ascendant à une particule d'air plus chaud que l'atmosphère environnante, ou au contraire freine l'ascension de l'air plus froid. Ainsi, selon la structure verticale des températures et des humidités, il est possible de classer les masses d'air en trois catégories : stabilité, indifférence, instabilité.

Cependant, dans le cas où l'air humide peut se saturer par détente, la stabilité apparente peut, en fait, se traduire par une instabilité sélective, permettant l'apparition de plages de convection déclenchées par le réchauffement du sol, et aussi par une instabilité convective, provoquée par un soulèvement de la masse d'air, au passage d'un relief, par exemple.

3.3.2. Causes de la convection. — Les mouvements convectifs ont généralement pour origine l'échauffement des basses couches en contact avec le sol qui absorbe le rayonnement solaire, le jour : l'activité maximale se produit alors au cours de l'après-midi.

Ils peuvent aussi être engendrés par un soulèvement de la masse d'air instable, soit au passage d'une ligne de collines ou d'une montagne, soit par effet de « coin » sur une masse d'air plus froide, associée à une surface frontale, soit également par suite d'une turbulence d'échelle suffisante, provoquée par des inégalités de température au sol ou par une orographie perturbée.

Selon la nature et l'importance de l'instabilité, mais aussi selon la cause directe de la convection, divers types de nuages convectifs peuvent apparaître : à l'inverse des nuages stratiformes, leur extension horizontale est généralement inférieure à leur développement vertical.

3.3.3. Les nuages de convection. — Selon le degré d'instabilité de la masse d'air et l'évolution diurne des températures au sol, les nuages de convection formés couvrent une proportion plus ou moins grande du ciel et atteignent un développement vertical différent, en s'organisant éventuellement en lignes parfois continues.

Les petits cumulus de beau temps naissent dans la matinée pour disparaître ensuite. Les cumulus de l'après-midi sont généralement plus dispersés mais bourgeonnent et sont le siège de fortes turbulences internes donnant souvent lieu à des averses dès que leur extension verticale est suffisante (2 000 m, par exemple).

Les cumulonimbus peuvent se développer jusqu'à la tropopause, en étant alors surmontés d'une « enclume » d'étalement ; ils sont généralement accompagnés de fortes averses de pluie, ou même de grêle, ou de neige. Ils sont parcourus de courants verticaux ascendants intenses, dépassant fréquemment 15 m/s, associés à de larges zones de subsidence et couplés à de fortes turbulences et aux phénomènes orageux habituels (fig. 20).

3.3.4. Les phénomènes orageux. — Engendrées par de fortes ascendances verticales, de véritables « cheminées » aspirent l'air instable et humide réchauffé au sol. Par cet entraînement vertical, l'air se refroidit rapidement et cela provoque la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes, elles-mêmes emportées par ce jet d'air jusqu'à des altitudes où règnent des températures négatives. Elles peuvent alors s'évaporer ou se congeler, soit lentement, soit brutalement par cessation d'un état de surfusion accompagné d'un dégagement de chaleur. Simultanément, la turbulence provoque les rencontres et l'agglomération des gouttes (ou des cristaux) et leur grossissement, jusqu'au moment où les vitesses verticales de l'air sont insuffisantes pour les maintenir : elles redescendent donc en heurtant et en capturant de petites gouttelettes éventuellement surfondues (fig. 21). Selon l'intensité des phénomènes, les durées de séjour des gouttes dans la colonne ascendante et les températures rencontrées, on obtient de la pluie (ou de la neige) en averse, ou des grêlons de dimensions très variables.

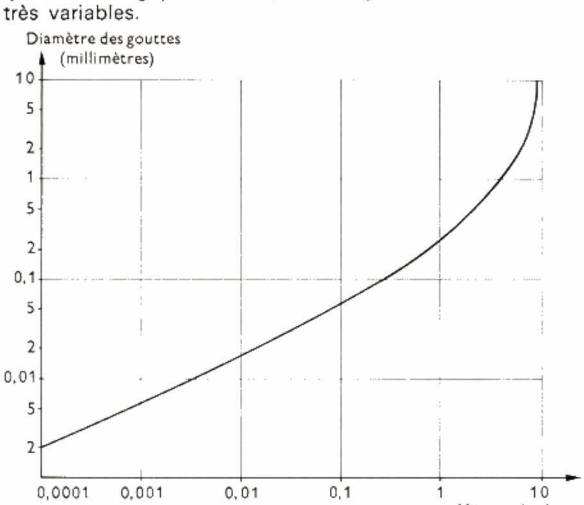


Fig. 21 — Diamètre des gouttelettes d'eau en fonction des vitesses de chute dans l'air (dans les basses couches)

À toutes ces transformations physiques sont associés des phénomènes électriques, qui se traduisent par une séparation des charges dans le plan vertical. De forts champs électriques se créent et se développent, jusqu'au moment où, compte tenu de la conductibilité du nuage, une décharge se produit, qui amorce un canal ionisé dans lequel se produisent généralement plusieurs décharges successives : c'est là l'origine des éclairs, accompagnés de roulements de tonnerre qui traduisent acoustiquement les fortes et rapides variations de pression tout au long du trajet de l'éclair.

Parfois, les éclairs se produisent entre nuages voisins, même à des altitudes très grandes, mais généralement, les plus visibles sont ceux qui s'établissent entre un nuage orageux et le sol ; ils donnent lieu à des effets souvent spectaculaires.

Ainsi, au sein de tels orages, de nombreux dangers se manifestent à tous les niveaux : phénomènes électriques brutaux, turbulence, risques de givrage, possibilités de grêlons.

3.4. Les influences locales. — Quelles que soient les manifestations météorologiques envisagées, elles sont en

grande partie conditionnées par l'influence directe de la surface terrestre sous-jacente : sa nature, sa couleur et sa température, sa rugosité, son alimentation en eau, sont autant de facteurs qui déterminent l'évolution locale des vastes phénomènes décrits précédemment.

3.4.1. Relief et orographie. — Une ligne de crête peut servir de véritable barrage à une invasion d'air froid, en la bloquant jusqu'à un débordement éventuel. Une arrivée d'air chaud et humide se traduit par de fortes pluies sur le versant au vent, et par l'échauffement et l'assèchement de l'air sous le vent. Les trajets des orages sont souvent guidés par l'existence de lignes de collines ou de vallées nettement marquées.

Il est inutile de rappeler la stagnation des brouillards dans les vallées ou la formation des brises de pente ou de montagne, mais il faut signaler la création d'ondes de relief, souvent mises à profit par les planeurs car elles engendrent des zones stables d'ascendances.

On doit également noter l'influence de la géographie régionale sur le déclenchement des orages, sur le renforcement ou la déviation des vents, même en altitude (mistral), sur la déformation des surfaces isobares (dépression au sommet d'une montagne) et, surtout, sur l'évolution et le déplacement des manifestations météorologiques liées aux surfaces frontales.

3.4.2. Nature et revêtement du sol. — Les turbulences induites par une forêt de sapins et par un champ de blé sont évidemment très différentes et modifient les possibilités d'évaporation, donc d'alimentation de l'air en vapeur d'eau. Les grandes surfaces désertiques sèches ne permettent pas la régulation thermique due aux phénomènes d'évaporation, qui sont fondamentaux sur les océans. Le sable blanc absorbe près de deux fois moins d'énergie solaire qu'une terre cultivée, mais peut cependant s'échauffer beaucoup plus en surface.

Tous ces aspects divers interviennent évidemment, par l'intermédiaire des températures et des évaporations en surface, sur l'évolution des masses d'air, sur la création d'hétérogénéités qui peuvent provoquer des turbulences et des courants verticaux convectifs, sur la formation des brouillards et sur celle des brises de terre ou de mer, bref, sur de nombreux phénomènes, le plus souvent locaux.

3.5. Givrage et brouillard. — Parmi les phénomènes dangereux, deux d'entre eux n'ont été qu'abordés et doivent être précisés : il s'agit du givrage et du brouillard.

3.5.1. Le givrage. — Il ne peut guère se produire que dans la troposphère, car il reste lié à la présence des nuages qui matérialisent l'eau sous sa phase liquide ou solide. On ne parlera pas ici du givre de condensation, tel qu'on l'admire sur les branches en hiver, et qui reste toujours d'intensité faible, mais seulement du givrage de type verglas (gouttes de pluie en surfusion se congelant brutalement, par exemple, à l'occasion d'un choc) et du givre blanc, formé par la congélation de nombreuses gouttelettes emprisonnant de multiples petites bulles d'air.

Le givrage le plus brutal se produit donc dans la pluie et dans les gouttelettes de nuages en surfusion, c'est-à-dire encore à l'état liquide tout en étant à une température très inférieure à 0 °C : cet état instable peut exister jusqu'à — 20 °C et même — 40 °C. Selon la vitesse des véhicules, mais aussi selon l'altitude de vol, les zones de températures les plus dangereuses, au sein des nuages fortement chargés en eau, varient de — 5 °C (avions lents) à — 25 °C (avions à réaction), les givrages les plus importants se produisent en général vers — 12 °C.

On rappelle également qu'un givrage temporaire peut se produire lorsqu'un avion, provenant d'une région froide, atteint des zones à température voisine de 0 °C : des dépôts de neige mouillée peuvent alors devenir gênants et même dangereux aux faibles vitesses.

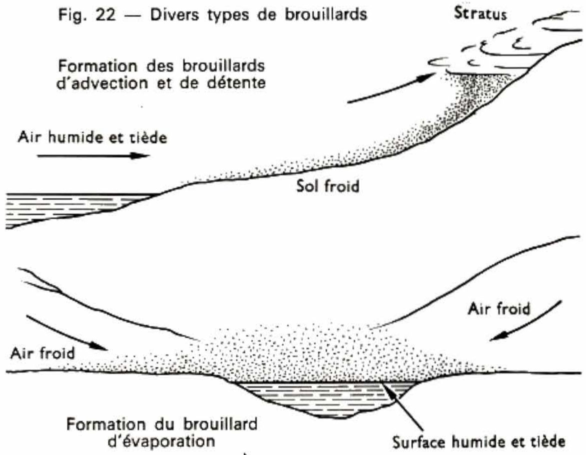
Par ailleurs, indépendamment du givrage des ailes ou du corps de l'appareil, il faut également signaler le givrage de l'entrée d'air des réacteurs et aussi le givrage des carburateurs, qui se produisent surtout pour de fortes humidités et même à température élevée, par exemple, en régions équatoriales. Quant aux incidences multiples du givrage (augmentation de la vitesse critique, décentrage, blocages divers), les chapitres ultérieurs les préciseront, en indiquant les moyens de lutte utilisés.

3.5.2. Le brouillard. — Sans chercher à approfondir les mécanismes physiques qui provoquent la création du brouillard, et dont la connaissance permettrait d'envisager leur dissipation artificielle, il semble utile de préciser les conditions de formation des divers types de brouillard fréquemment rencontrés (fig. 22).

— *Brouillard de rayonnement.* — Il se forme durant les nuits de vent faible, lorsque le ciel est dégagé et le sol relativement humide, par suite de la stagnation de l'air refroidi au contact du sol. Le brouillard « colle » au sol surtout dans les bas-fonds, en restant très local ; il se présente alors le plus souvent sous forme de « nappes » ou de « bancs », parfois très denses. Il ne se dissipe que le jour, lorsque le réchauffement dû au rayonnement solaire est suffisant, ou dans le cas de création de turbulences importantes. Pour ce type de brouillard, par exemple, le brassage de l'air par hélicoptère se révèle souvent un moyen efficace de dissipation. On peut aussi envisager sa suppression par condensation (détente de propane pour les brouillards glacés) ou par évaporation (échauffement de l'air par réacteur).

— *Brouillard d'advection.* — Il se produit lorsqu'une masse d'air chaud et humide parvient au contact d'un sol relativement froid, sous réserve que la turbulence soit réduite et le vent peu violent. Sa dissipation est généralement lente.

Fig. 22 — Divers types de brouillards



— *Brouillard d'évaporation.* — Il se forme lorsqu'une couche d'air froid passe sur une surface humide et relativement chaude, et ne persiste que si la stabilité de l'air froid est nettement marquée. Il ne disparaît qu'en fonction de l'évolution de la température de l'air.

— *Brouillard de mélange.* — Il est engendré par le mélange de deux masses d'air humide à des températures suffisamment différentes pour que la saturation soit dépassée lorsque l'équilibre thermique est atteint.

C'est là une cause assez fréquente des brouillards ou même des nuages frontaux, mais aussi de certains brouillards d'advection.

— *Brouillard de détente.* — Il s'agit là de l'origine habituelle des formations nuageuses, par exemple, lorsque l'air remonte une pente sous l'action du vent (convection forcée).

— *Brouillard de fumée* (smog). — Généralement formé à partir d'un brouillard d'advection, ce type de brouillard est restreint aux régions industrielles. D'une part, il est souvent accru par la pollution existante, d'autre part, il contient de nombreuses particules et composés chimiques nocifs. Il persiste avec les inversions de température et ne peut guère se dissiper que sous l'action d'un vent assez fort ou par lessivage de l'atmosphère par la pluie.

4. LA STRATOSPHÈRE

La stratosphère est limitée, vers le bas, par la tropopause dont l'altitude est voisine de 10 à 12 km en moyenne, et, vers le haut, par la stratopause, qui la sépare de la mésosphère, et dont l'altitude avoisine 50 à 60 km. Certains

auteurs prennent une limite supérieure intermédiaire, située vers 30 ou 35 km.

4.1. Caractéristiques physiques

4.1.1. Température. — Voisines de — 50 °C à — 70 °C à la base, la température reste d'abord stationnaire puis s'élève jusqu'à + 15 °C vers 55 km en été, ou jusqu'à — 20 °C vers 65 km en hiver.

Compte tenu de cette structure, il est rare que les nuages à développement vertical pénètrent largement dans la stratosphère, qui reste généralement claire.

Il convient cependant de noter les variations de températures très fortes et rapides qui se produisent, surtout vers les altitudes de 20 à 25 km : des refroidissements spectaculaires peuvent atteindre 20 °C en 6 heures. On a relevé ainsi l'existence de grands réchauffements, surtout en hiver, débutant par les niveaux les plus élevés : leurs liens avec les éruptions solaires restent à préciser mais semblent maintenant bien établis (fig. 23).

4.1.2. Teneur en eau. — L'humidité reste mal connue et ne peut guère qu'être estimée à partir de quelques observations indirectes. La présence des nuages nacrés

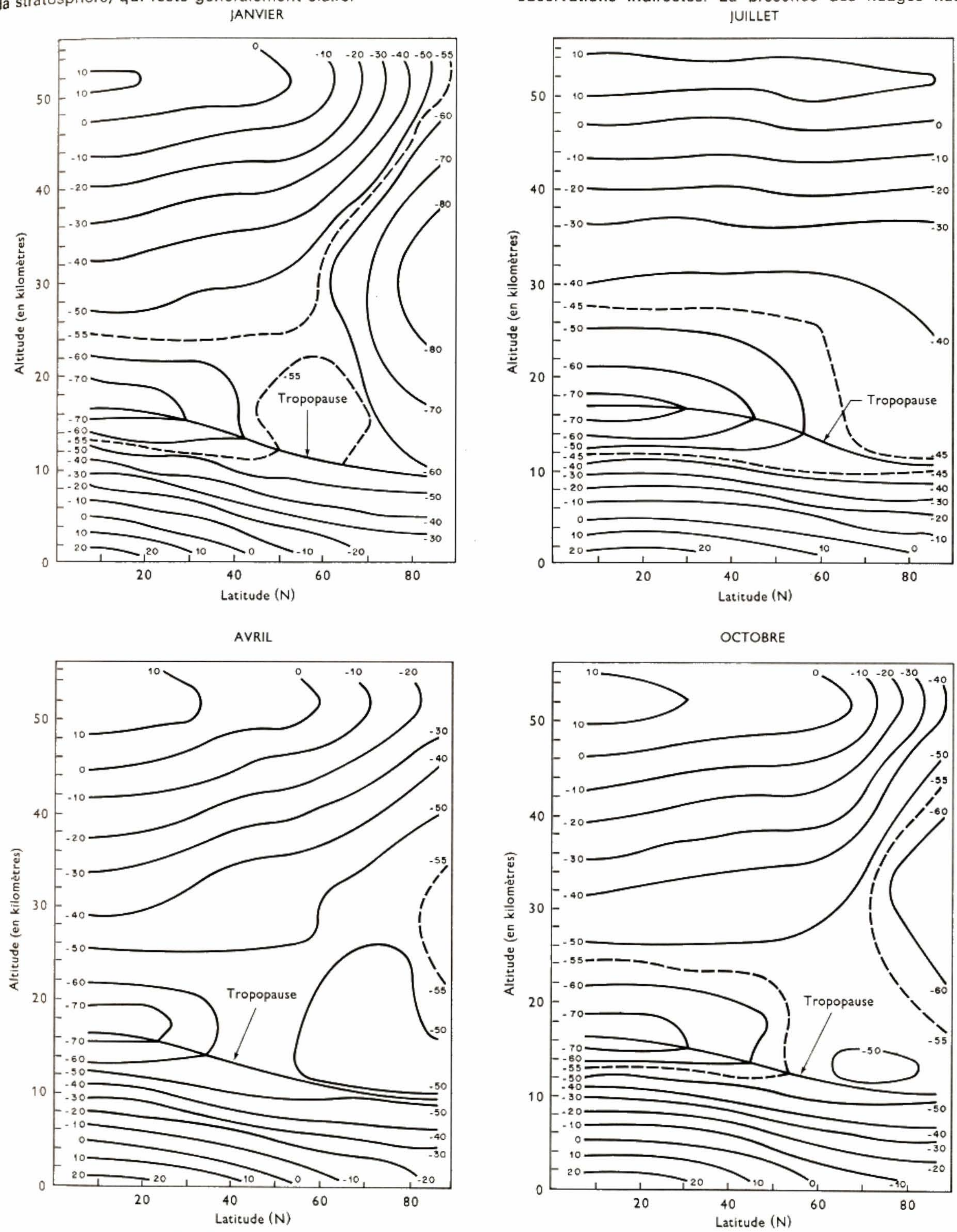
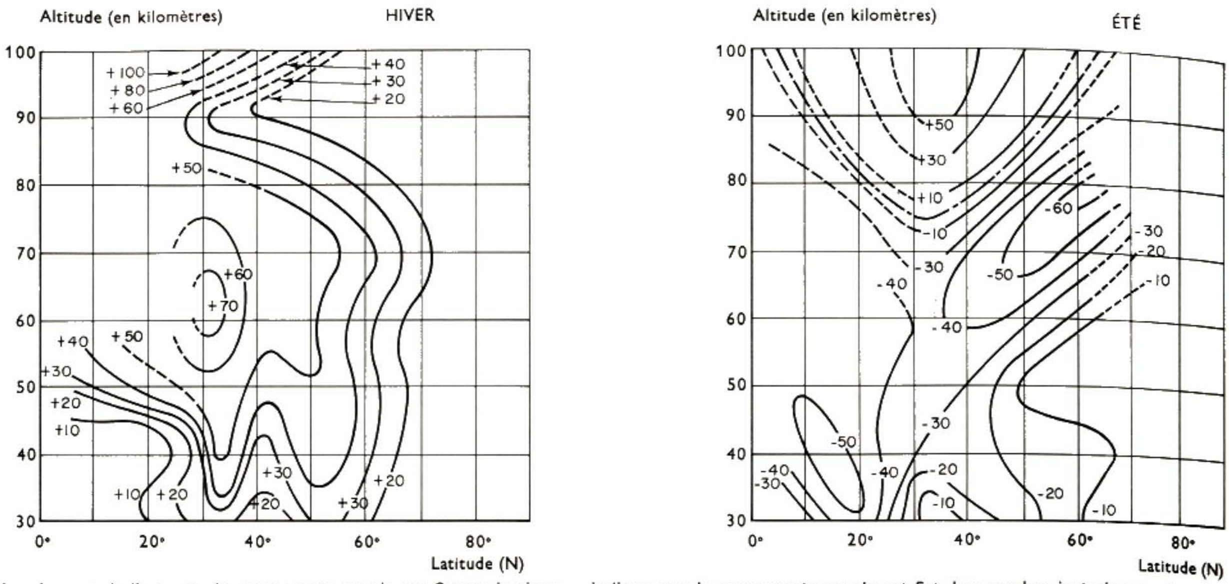


Fig. 23 — Températures moyennes selon l'altitude et la latitude (*Compendium of Meteorology*)



Le signe + indique que la composante zonale est Ouest ; le signe — indique que la composante zonale est Est. Les courbes isotaches sont cotées en mètres par seconde et concernent la composante Est-Ouest.

Fig. 24 — Vents moyens à haute altitude (*Compendium of Meteorology*)

pose encore divers problèmes, mais on estime actuellement que ceux-ci proviennent d'invasions d'air arctique en altitude et sont composés de microsphères de glace. Leur altitude est d'environ 25 km et on ne les rencontre guère qu'en hiver, généralement sous une forme lenticulaire qui a souvent provoqué une explication de leur origine par des phénomènes orographiques.

4.1.3. Pression. — En relation directe avec les températures le domaine de pressions que recouvre la stratosphère s'étend entre 200 mbar (de 300 à 100 mbar) et 1 mbar environ.

4.1.4. Vent. — En moyenne, les vents d'Est croissent avec l'altitude dans la stratosphère, et les vents d'Ouest, fréquents dans la tropopause, se transforment souvent en vents d'Est à des altitudes supérieures.

4.2. Composition chimique et aérosols. — Les principaux constituants gazeux restent identiques à ceux de la troposphère et se retrouvent dans des proportions semblables, hormis l'ozone dont l'existence est à l'origine du lent réchauffement de la stratosphère avec l'altitude.

4.2.1. L'ozone. — Pratiquement, la présence de l'ozone est assez caractéristique de la stratosphère : la quantité maximale par unité de volume se trouve en général vers 25 km, alors que la concentration maximale se produit au-delà, vers 35 km d'altitude.

Très important pour abriter le sol des radiations ultraviolettes provenant du soleil, l'ozone contenu dans la stratosphère peut être caractérisé par son épaisseur réduite aux conditions normales de pression et température, soit 2 à 3 mm. Cette épaisseur réduite varie selon la latitude et la saison (avec un minimum à l'équateur), mais elle reste toujours suffisante pour absorber presque totalement le rayonnement ultraviolet entre 0,2 et 0,3 μm.

L'ozone est formé à partir de molécules d'oxygène normal et d'oxygène monoatomique, par des réactions complexes qui font appel à d'autres molécules gazeuses, azote en particulier. Il présente une faible bande d'absorption dans le visible vers 0,6 μm, ainsi qu'une forte bande caractéristique autour de 9,6 μm (elle intervient de façon non négligeable pour les calculs de transfert d'énergie rayonnée).

4.2.2. Aérosols. — Une couche d'aérosols assez bien marquée apparaît souvent, à diverses latitudes, entre 15 et 25 km. Il semble qu'elle provienne principalement de l'oxydation de composés du soufre, entraînant la formation de sulfates, dont le sulfate d'ammonium en particulier. Les particules restent de très faibles dimensions (quelques micromètres au maximum).

4.3. Phénomènes particuliers. — Aucun phénomène dangereux n'a encore été noté au sein de la stratosphère, qui reste le domaine de prédilection des supersoniques. Seul le contenu en ozone a posé quelques problèmes, et il convient de noter une augmentation sensible du rayonnement ultraviolet, le jour au-delà de 35 km. Quant aux turbulences parfois brutales qui y sont notées, leur étude est en cours.

Par ailleurs, les mouvements de l'atmosphère à ces niveaux restent encore mal expliqués, tout autant que les fortes et brutales variations de température. Il semble cependant que les recherches en cours, en liaison avec les effets de l'activité solaire, devraient d'ici peu compléter nos connaissances et accroître les possibilités de prévision. Enfin, il faut noter l'intérêt de l'ozone comme traceur pour matérialiser les transferts de masse verticaux entre la stratosphère et la troposphère et aider à la compréhension de la dynamique de l'atmosphère (fig. 24).

5. LA MESOSPHÈRE ET LA THERMOSPHÈRE

Au-delà de la stratosphère, pour des pressions inférieures à 1 mbar, on aborde le domaine de la mésosphère où la composition moléculaire de l'atmosphère reste très voisine de ce qu'elle est au sol, puis celui des couches gazeuses extrêmement ténues et fortement ionisées où la notion même de température d'un gaz devient peu significative.

5.1. La mésosphère. — Elle comprend la couche atmosphérique située entre la stratosphère et une altitude proche de 85 km. Sa limite inférieure est définie par la stratopause qui, selon les auteurs, est fixée,

— soit vers 30 km, niveau au-delà duquel la température commence à croître nettement mais lentement avec l'altitude,

— soit vers 50 km, niveau au-delà duquel la température cesse de croître et décroît constamment jusque vers 85 km.

Cette limite supérieure ou mésopause correspond assez bien au niveau à partir duquel la masse moléculaire de l'air commence à décroître par suite de dissociations multiples des molécules ; la température est voisine de — 70 °C à — 100 °C.

En général, vers le niveau 55 km, on relève un net maximum de la vitesse du vent qui atteint fréquemment 100 m/s, surtout l'hiver (vent d'Ouest), ou provenant de l'Est en été.

Les pressions s'échelonnent de 1 à 10^{-2} mbar et, vers 80 km, les molécules d'azote et d'oxygène prédominent nettement, au même titre que dans la stratosphère ou dans la troposphère. La mésosphère est d'ailleurs normalement

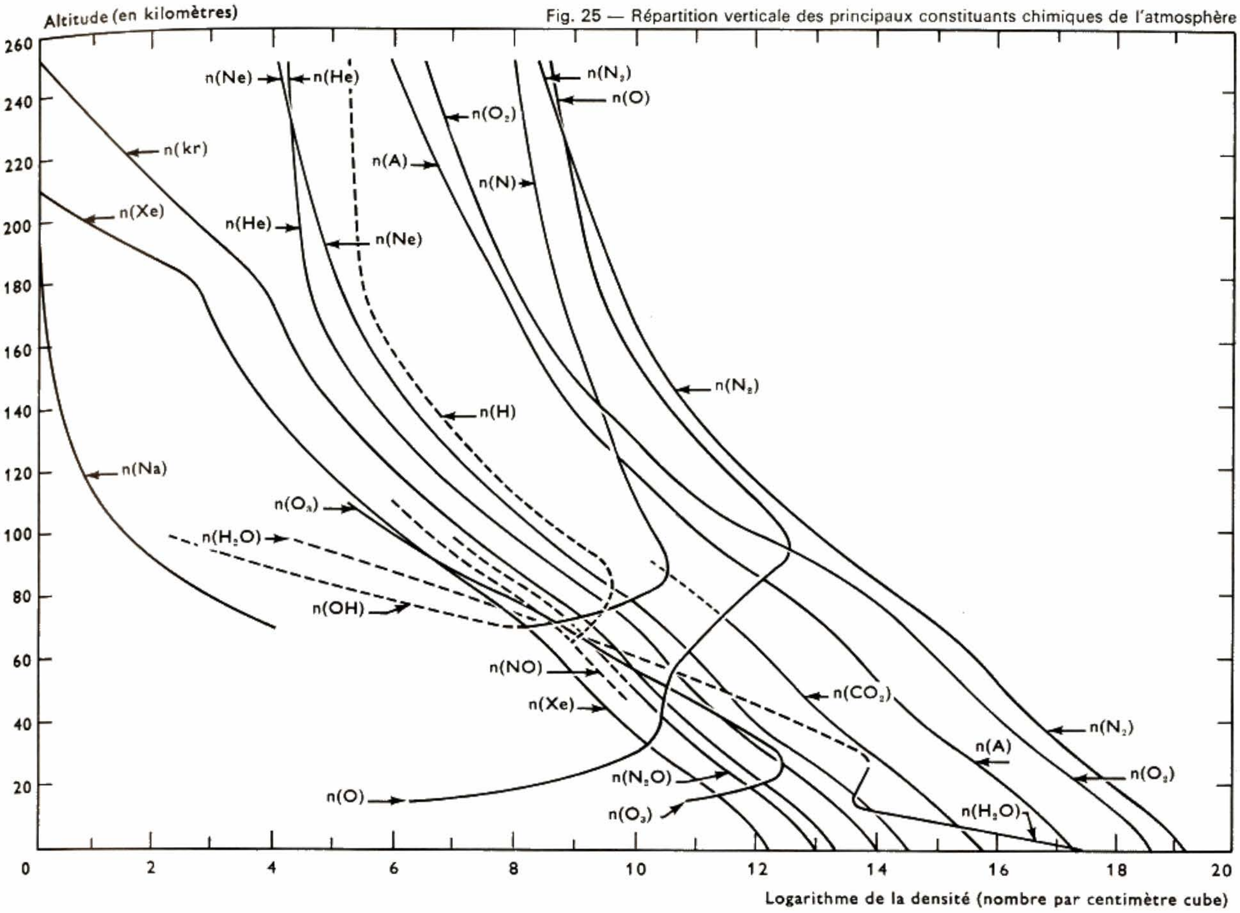


Fig. 25 — Répartition verticale des principaux constituants chimiques de l'atmosphère

intégrée à l'homosphère, définie comme la couche atmosphérique au sein de laquelle la composition chimique ne varie pas avec l'altitude et dont la limite supérieure est voisine de 100 km (fig. 25).

5.2. La thermosphère. — Principalement composée d'oxygène moléculaire et atomique et de molécules d'azote, la thermosphère voit sa température croître d'abord rapidement jusqu'à 1 000 °C vers 170 km d'altitude, puis lentement jusqu'à sa limite supérieure, atteinte pour une altitude proche de 800 km, au-delà de laquelle débute l'exosphère.

Simultanément, les pressions commencent par décroître assez rapidement de 10^{-2} à 10^{-5} mbar entre 80 et 120 km, puis plus lentement en atteignant 10^{-9} mbar vers 800 km d'altitude, niveau auquel la masse moléculaire est voisine de 16 et où les températures dépassent 1 500 °C.

Mais la notion même de température doit être sérieusement corrigée et précisée par de nouvelles notions (température cinétique, température d'ionisation) liées aux très faibles densités rencontrées : on n'insistera pas sur cet aspect très particulier de la physique des basses pressions, dont l'importance n'est cependant pas négligeable pour mener à bien les calculs concernant l'orbite des satellites artificiels et leur rentrée dans l'atmosphère.

Le problème des vents et de la turbulence n'a également aucune signification, tout au moins à l'échelle des véhicules aérospatiaux, et ne peut être étudié que pour des dimensions qui justifient seulement une exploitation synoptique ou statistique.

Dans la thermosphère, les quantités d'hydrogène et d'hélium atomique restent à peu près constantes par unité de volume, alors que, lorsque l'altitude croît, les molécules d'azote tendent à se dissocier en atomes. Vers 500 km, on trouve environ cinq fois plus d'oxygène monoatomique (10^8 atomes par centimètre cube) que d'azote monoatomique, dix fois moins d'azote moléculaire, cent fois moins d'hydrogène et environ mille fois moins d'oxygène moléculaire, en quantité voisine de celle de l'hélium (2.10^4 atomes par centimètre cube).

5.3. L'ionosphère. — Indépendamment de la décomposition de l'atmosphère en troposphère, mésosphère et thermosphère (à partir de critères combinés d'altitude, de pression et de température), on entend par ionosphère la partie de l'atmosphère qui comprend la partie supérieure de la mésosphère et une grande partie de la thermosphère, telles qu'elles viennent d'être définies toutes deux. L'ionosphère est caractérisée par une forte ionisation, et se décompose généralement en trois couches de caractéristiques spécifiques (fig. 26).

5.3.1. Couche D. — Vers 80 km d'altitude, cette couche faiblement ionisée (10^3 atomes par centimètre cube) absorbe déjà les ondes courtes par suite d'une fréquence critique de 500 kHz environ. Son activité reste fonction du flux ionisant provenant du Soleil et devient maximale après les éruptions chromosphériques du Soleil.

5.3.2. Couche E. — Située à une altitude de 100 à 120 km, l'ionisation y atteint 10^5 atomes par centimètre cube le jour, entraînant une fréquence critique voisine de 3,5 MHz. Son origine semble liée à l'action du rayonnement X mou provenant du Soleil. Elle disparaît totalement la nuit.

5.3.3. Couche F. — S'étendant entre 200 et 400 km d'altitude, elle se sépare souvent, le jour, en deux couches, F_1 et F_2. Elle est affectée de variations brusques liées aux orages magnétiques, eux-mêmes déterminés par l'activité solaire. L'existence de cette couche paraît provenir de l'absorption des longueurs d'onde inférieures à 20 nm (200 Å).

Dans la haute ionosphère se produisent également les aurores polaires, dont l'étude spectrale révèle en particulier la présence de l'atome d'oxygène. On a pu alors y mesurer, par des moyens radioélectriques, une densité électronique proche de 10^8 atomes par centimètre cube et constater des déplacements rapides à des vitesses de 1 à 2 km/s. Il ne s'agit pas, dans ce cas, des effets directs du rayonnement solaire : l'excitation semble due principalement à des

particules électrisées, guidées par le champ magnétique, et dont la quantité reste liée à l'activité solaire.

On doit également noter la luminance du ciel nocturne, caractérisé par des raies d'émission spécifiques de l'oxygène et du sodium, en particulier.

Pour les couches ionisées précédemment décrites, leurs effets d'écran peuvent être rappelés en ce sens que chacune d'elles protège les altitudes inférieures des rayonnements solaires et des particules qu'elle absorbe, mais aussi que les fréquences radioélectriques inférieures aux valeurs critiques sont pratiquement bloquées ; elles empêchent ainsi toute liaison entre le sol et des altitudes supérieures à l'aide de signaux de fréquence inférieure à un seuil critique, par exemple de 20 MHz.

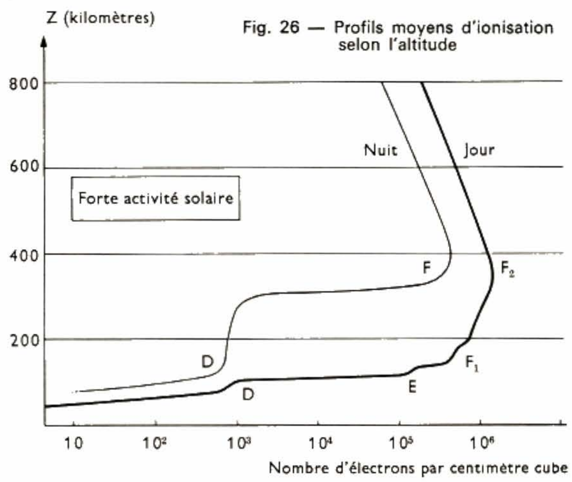
6. L'EXOSPHÈRE ET L'ESPACE INTERPLANÉTAIRE

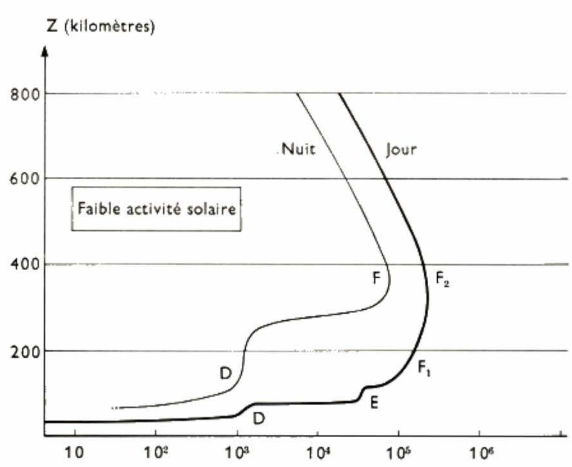
L'exosphère est la partie la plus externe de l'atmosphère terrestre, au-delà de 800 km. Elle se caractérise par une très faible densité, déterminant un libre parcours moyen des particules important, leur permettant, pour autant qu'elles soient électriquement neutres, de quitter le domaine de l'attraction terrestre, de s'évaporer dans l'espace.

Le nombre de particules ionisées reste encore grand et l'existence de particules de haute énergie est un trait caractéristique de l'exosphère. L'hydrogène monoatomique prédomine et la température est voisine de 1 000 °C.

6.1. Les ceintures de Van Allen. — À quelques milliers de kilomètres de la surface terrestre, à une altitude de l'ordre d'un rayon terrestre, circulent des particules, électrons et protons, de grande vitesse et de haute énergie, « piégées » dans le champ magnétique terrestre. Leur nombre varie de manière notable, surtout celui des électrons. Leurs origines semblent différentes selon les zones envisagées :

Fig. 26 — Profils moyens d'ionisation selon l'altitude





— origine terrestre pour la partie interne des ceintures, du fait de la désintégration des neutrons formés lors de la réaction des protons cosmiques avec les gaz atmosphériques ;

— origine solaire probable pour la partie externe des ceintures et pour les particules aurorales.

On y trouve ainsi à la fois des particules α et des ions carbone, azote et oxygène, dont la quantité et l'énergie peuvent varier dans de larges limites selon le moment et la latitude. Cependant, la recherche de leurs effets biologiques éventuels exige de pouvoir connaître avec une précision accrue leur répartition dans le temps et dans l'espace : dans ce but, l'exploitation des satellites artificiels a déjà apporté maintes informations et reste le seul moyen d'exploration directe de ces zones dangereuses.

6.2. La magnétosphère. — Sans obstacle ni écran dans l'espace, le champ magnétique terrestre devrait obéir à la loi de décroissance habituelle du champ d'un dipôle (c'est-à-dire comme d^{-3}, inverse du cube de la distance d du point considéré au centre du dipôle). Mais le mouvement des gaz ionisés crée également un champ magnétique complémentaire et les mesures effectuées par satellites ont montré clairement que le champ magnétique résultant différait très nettement selon les orientations retenues par rapport à la direction du Soleil (fig. 27).

Jusqu'à cinq rayons terrestres, la loi en d^{-3} se vérifie approximativement. Dans la direction du Soleil, le champ décroît ensuite beaucoup moins vite, jusqu'à dix rayons terrestres environ, puis il diminue brutalement sur quelques centaines de kilomètres, en changeant de direction. Au-delà, une forte turbulence magnétique se manifeste avant de trouver, vers quinze rayons terrestres, les valeurs normales et relativement stables du champ magnétique interplanétaire.

Dans la direction opposée au Soleil, le champ décroît un peu plus vite que prévu jusqu'à huit rayons terrestres, puis reste stable jusqu'à quinze ou vingt rayons terrestres au moins.

Ces configurations étranges résultent de l'interaction du vent solaire sur le champ géomagnétique : la surface extérieure de la zone turbulente orientée vers le Soleil matérialise une véritable onde de choc, alors que, du côté opposé, semble exister une longue traînée en forme de sillage, d'ailleurs mal connue.

6.3. L'espace interplanétaire. — On a déjà signalé l'existence normale du *vent solaire* composé de protons, mais aussi d'hélions et d'ions oxygène, d'intensité directement liée à l'activité solaire et dont la vitesse moyenne reste de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres par seconde ; il lui faut donc quelques dizaines d'heures pour parvenir à la Terre.

— Les *rayons cosmiques*, d'origine solaire, galactique ou extragalactique, possèdent des énergies énormes que les plus puissants accélérateurs existants ne peuvent même pas approcher et qui interdisent généralement toute connaissance directe de leur nature même.

Au niveau des rayons cosmiques primaires, on peut seulement affirmer qu'il s'agit principalement de particules électrisées, chargées positivement, formées de protons et aussi de noyaux d'éléments divers (dans des proportions voisines de celles des éléments existant dans l'univers), une durée de quelques heures leur suffit pour atteindre la Terre, après avoir été émis par le Soleil. La fréquence d'occurrence est, en moyenne, divisée par 100 lorsque l'énergie est multipliée par 10, tout au moins au-delà de 1 Gev et jusqu'à 10^{20} électronvolts (on rappelle qu'un gigaélectronvolt (GeV) est égal à 10^9 électronvolts ; 1 eV = $1{,}6 . 10^{-19}$ J).

— Les *rayonnements électromagnétiques* ont également été signalés, avec des origines diverses dont le Soleil reste pourtant la plus importante au voisinage de la Terre : ondes radioélectriques étudiées par la radioastronomie (longueurs d'onde comprises entre plusieurs kilomètres et quelques millimètres) rayonnements infrarouges émis par la matière entre 0,1 mm et 1 μm, rayonnements visibles (entre 0,7 et 0,4 μm), rayonnements ultraviolets (300 à 10 nm), rayonnements γ ou X (jusqu'à 2 Å et même moins).

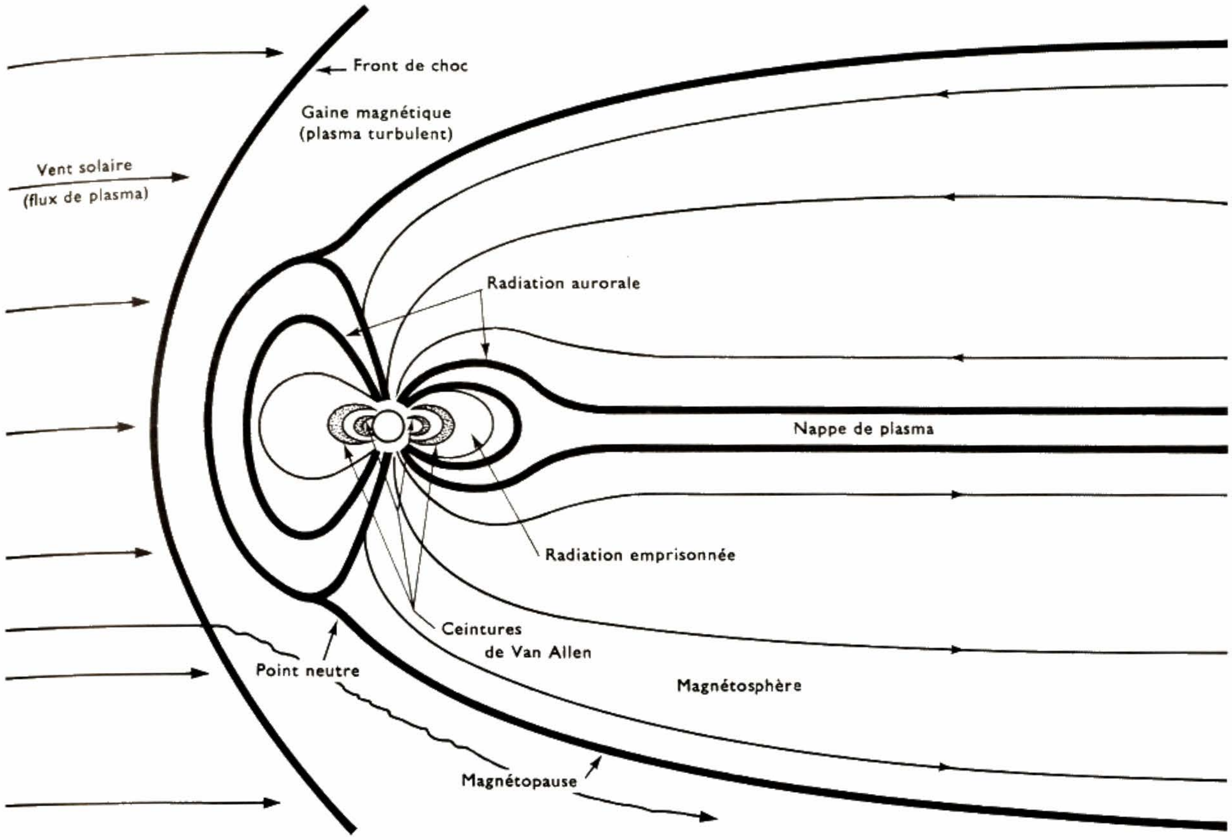


Fig. 27 — Coupe de la magnétosphère

Ces rayonnements se propagent dans l'espace interplanétaire et baignent tous les corps qui le parcourent.

— De plus, des *particules météoriques* sillonnent cet espace, ne matérialisant leur présence que par les phénomènes lumineux accompagnant leur entrée dans l'atmosphère terrestre. De dimensions très variées, leur abondance est variable selon l'époque de l'année et le lieu.

— Pour compléter cet ensemble d'influences variées agissant dans l'espace interplanétaire, il convient de rappeler l'importance essentielle des *champs gravifiques*, fondement même de la mécanique des corps célestes et base essentielle du calcul des trajectoires de satellites dès que ceux-ci se sont dégagés de l'atmosphère terrestre.

7. CONCLUSIONS

Alors que l'air, avec ses caractéristiques physiques et chimiques, comme avec ses mouvements propres et les manifestations météorologiques qui en découlent, représente la principale expression du milieu jusqu'à 20 ou 30 kilomètres d'altitude, au-delà ce sont avant tout les rayonnements corpusculaires et électromagnétiques qui définissent l'environnement des véhicules aérospatiaux.

On a passé en revue les divers phénomènes de la troposphère et surtout ceux des basses couches puisque tout véhicule, avion ou fusée, trouve à ces niveaux les phases les plus critiques de son vol.

On a même esquissé les principes de la science météorologique, sans cependant nous appesantir sur les méthodes de prévision, en pleine évolution grâce à l'apparition des grands calculateurs électroniques. Et si l'on a examiné plus rapidement les couches atmosphériques supérieures, cela est dû aussi bien au fait qu'elles restent encore peu ou mal connues qu'à leur moindre importance quotidienne pour le commun des utilisateurs.

C'est dans cet esprit également que l'on a insisté particulièrement sur les phénomènes les plus dangereux pour les véhicules comme pour leurs pilotes ou leurs passagers, à toutes les altitudes.

Ainsi, on a été conduit à négliger l'un des facteurs les plus importants de la météorologie de la troposphère, également fondamental au sein de l'espace, à savoir les **échanges énergétiques par rayonnement.** Il s'agit là, en effet, du moteur même des transformations thermodynamiques qui se matérialisent dans l'atmosphère, aussi bien localement et dans les basses couches, au contact de la surface terrestre qui absorbe le rayonnement solaire, qu'à l'échelle de notre planète, puisque la fraction d'énergie solaire absorbée est finalement, après transformations diverses, diffusée dans l'espace sous forme de rayonnements infrarouges de grandes longueurs d'onde.

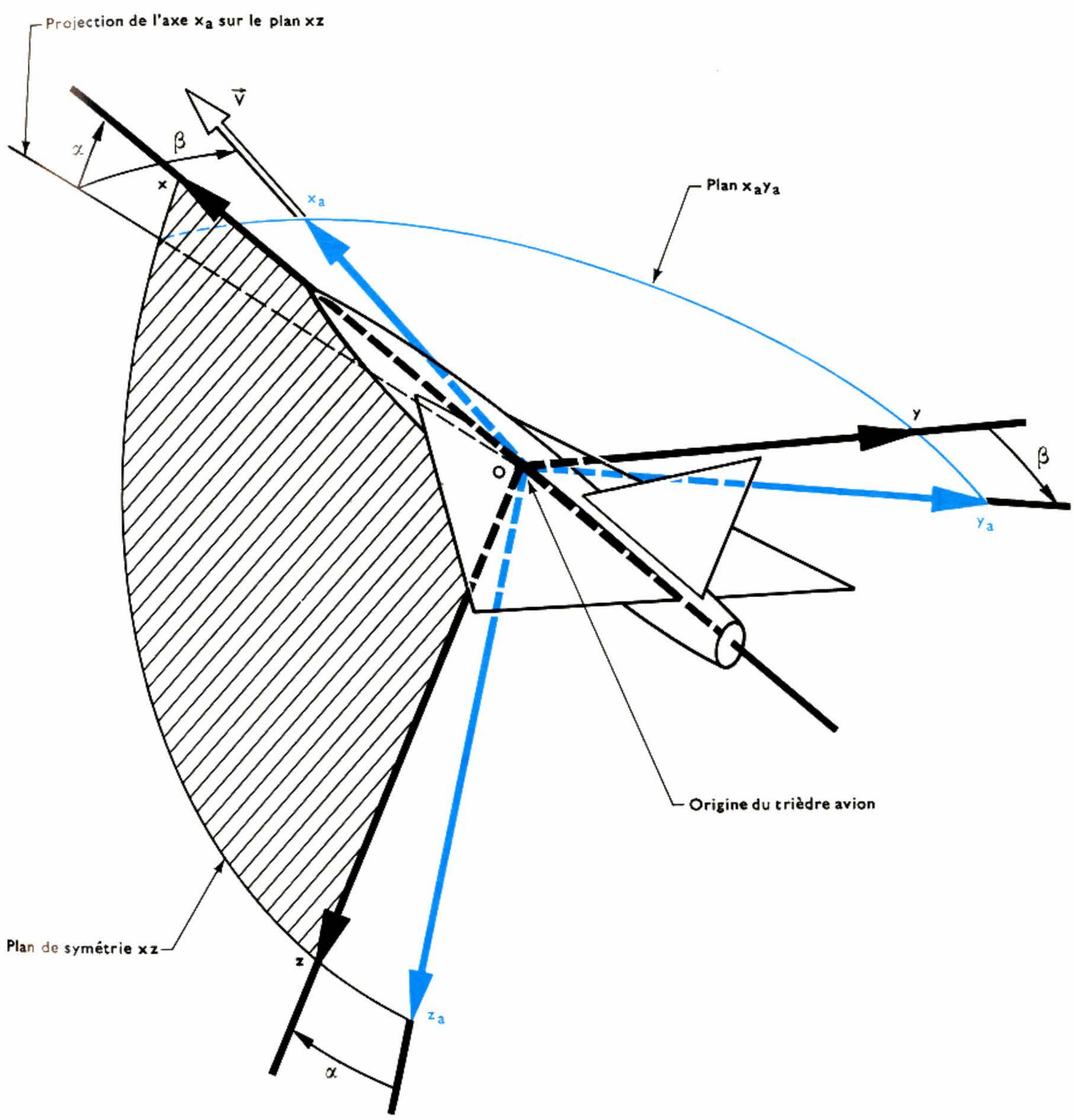
Le rayonnement solaire incident reste stable, connu, aisément calculable, relativement peu dense et sans conséquences énergétiques dangereuses ; au surplus, il a une origine bien déterminée. Le rayonnement infrarouge est l'ultime étape des manifestations énergétiques de l'homme, de l'atmosphère et de la planète ; bien que plus ténu que le rayonnement solaire il est plus universellement répandu car diffusé et émis naturellement par tous les corps.

On a donc passé sous silence les bases philosophiques de la météorologie, de même que l'on n'a pas abordé la gravitation universelle : ce sont là des lacunes, justifiées par le caractère pratique de cette courte étude, mais qu'il est souhaitable de combler par ailleurs. Seulement ainsi serait-il possible d'apprécier les ressources énergétiques permises à un satellite, isolé dans l'espace (animé par la seule captation de l'énergie solaire), ou d'estimer les caractéristiques thermiques optimales des vaisseaux spatiaux, qui ne peuvent éliminer l'énergie thermique résiduelle que par leur émission propre vers l'espace. De même cela permettrait de comprendre l'évolution thermique de l'atmosphère, au sein de laquelle les échanges radiatifs représentent la majeure partie des transferts énergétiques.

Cela n'étant pas notre propos initial, il convient de revenir pragmatiquement aux principes utilisés pour la réalisation des matériels aérospatiaux, dont le but est de se mouvoir dans le milieu complexe que l'on vient de schématiser à grands traits.

Repères utilisés en aéronautique

Figure 1 — Position angulaire du vecteur vitesse-air par rapport au trièdre avion



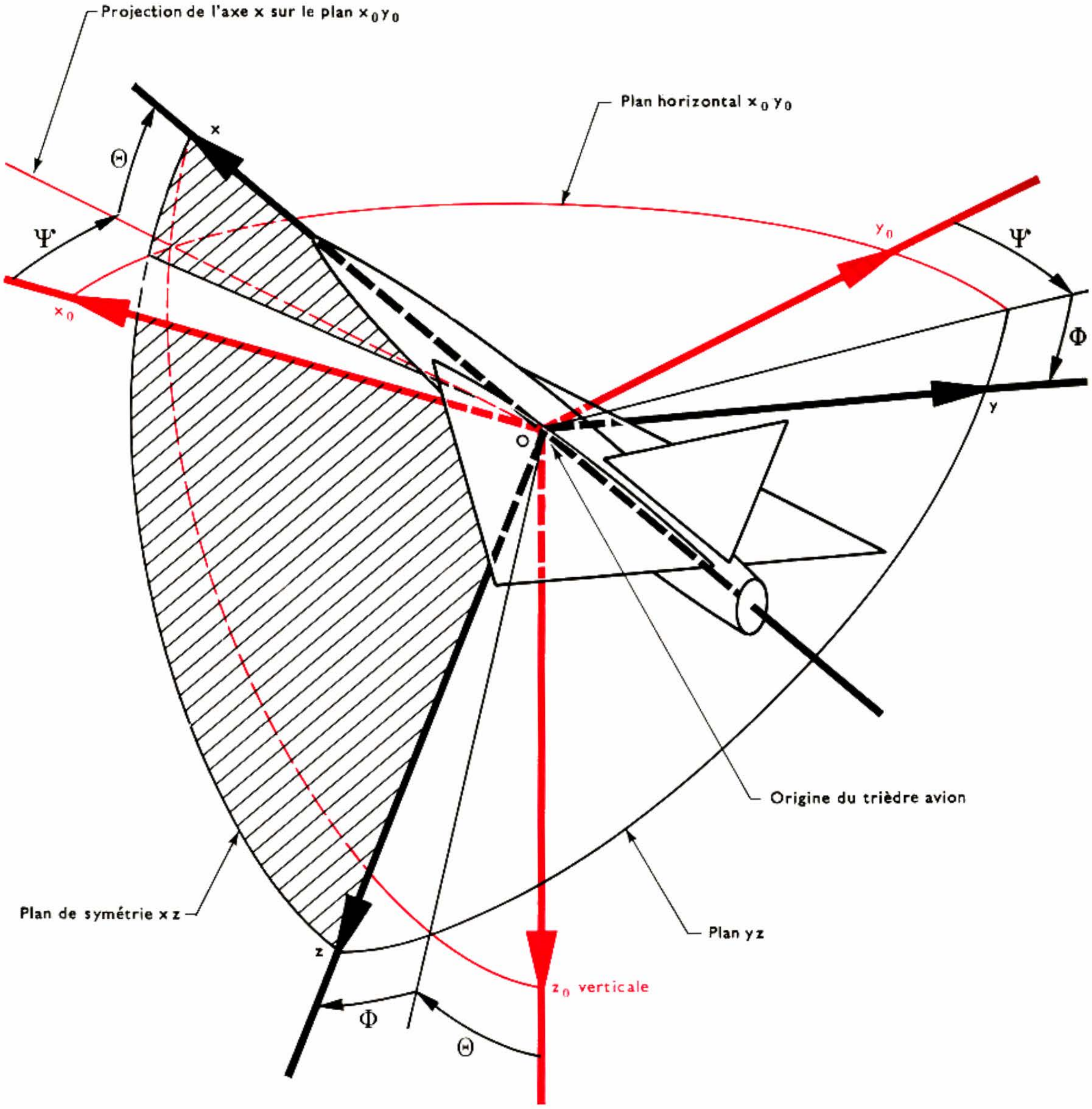
En noir : Trièdre avion xyz : plan de symétrie xz, axe longitudinal x, axe transversal y, axe normal z

En bleu : Trièdre aérodynamique x_a y_a z_a : axe x_a confondu avec le vecteur vitesse-air $\vec{V}$ du centre de gravité O de l'avion, axe z_a dans le plan de symétrie de l'avion, axe y_a complète le trièdre

NOTE — Les angles représentés sont positifs

Extrait de la norme française NF X 02-115 - Août 1970 (AFNOR)

Figure 2 — Position angulaire du trièdre avion par rapport au trièdre normal terrestre porté par l'avion



En rouge : Trièdre normal terrestre porté par l'avion x_0 y_0 z_0 : axe z_0 orienté suivant la verticale descendante, axe x_0 choisi selon les besoins, axe y_0 complète le trièdre

En noir : Trièdre avion xyz

NOTE — Les angles représentés sont positifs

PRINCIPAUX SYMBOLES UTILISÉS EN AÉRODYNAMIQUE ET EN MÉCANIQUE DU VOL

	Symbole	Unité SI	Symbole de l'unité
Accélération	Γ	mètre par seconde carré	m/s²
Accélération de la pesanteur	g	mètre par seconde carré	m/s²
Allongement d'une aile	λ		
Angle d'assiette longitudinale	Θ	degré ou radian	° ou rad
Angle de dérapage	β	degré ou radian	° ou rad
Angle de gîte	Φ	degré ou radian	° ou rad
Angle d'incidence	α (*i* en cas de confusion avec l'angle de Mach)	degré ou radian	° ou rad
Angle de Mach	α	degré ou radian	° ou rad
Azimut	Ψ	degré ou radian	° ou rad
Braquage d'une gouverne	δ suivi d'un indice approprié permettant d'identifier la gouverne considérée	degré ou radian	° ou rad
Célérité du son (vitesse du son)	a	mètre par seconde	m/s
Chaleur massique à pression constante	c_p	joule par kilogramme kelvin	J/kg.K
Chaleur massique à volume constant	c_v	joule par kilogramme kelvin	J/kg . K
Circulation (de la vitesse)	Γ	mètre carré par seconde	m²/s
Coefficient de conduction thermique	λ (ou conductibilité thermique)	joule par mètre seconde kelvin	J/m.s.K
Coefficient de force latérale	C_y		
Coefficient local de frottement	C_f		
Coefficient de moment de roulis	C_l } dans le trièdre avion		
Coefficient de moment de tangage	C_m } dans le trièdre avion		
Coefficient de moment de lacet	C_n } dans le trièdre avion		
Coefficient moyen de frottement	C_F		
Coefficient de pression	K_p		
Coefficient de portance	C_z		
Coefficient de trainée	C_x (ou coefficient de résistance aérodynamique)		
Coefficient de traînée de frottement	C_{xf}		
Coefficient de traînée de pression	C_{xp}		
Coefficient de traînée de portance (ou de traînée induite)	C_{xi}		
Coefficient de viscosité	μ (ou viscosité dynamique)	newton-seconde par mètre carré (ou poiseuille)	N . s/m² (ou Pl)
Coefficient de viscosité cinématique	$\nu = \mu/\rho$	mètre carré par seconde	m²/s
Composantes de la rotation instantanée :			
vitesse de roulis	p } dans le trièdre avion	radian par seconde	rad/s
vitesse de tangage	q } dans le trièdre avion	radian par seconde	rad/s
vitesse de lacet	r } dans le trièdre avion	radian par seconde	rad/s
Composantes de la vitesse	u, v, w dans le trièdre avion	mètre par seconde	m/s
Constante du gaz parfait	$R = \frac{r}{\mathcal{M}}$ (r constante universelle des gaz parfaits ; $\mathcal{M}$ masse molaire du gaz considéré)	joule par kilogramme kelvin	J/kg.K
Enthalpie massique	h	joule par kilogramme	J/kg
Envergure d'une aile	b	mètre	m
Facteur de charge (vecteur)	$\vec{n}$ (n)		
Finesse	$f = C_z/C_x$		

	Symbole	Unité SI	Symbole de l'unité
Flèche d'une aile	φ	degré	°
Flux de chaleur	φ	joule par mètre carré seconde	$J/m^2.s$
Force aérodynamique du « planeur » (avion sans propulsion)	$\vec{R_A}$ (R_A) ou $\vec{R}$ (R) s'il n'y a pas ambiguïté	newton	N
Force résultante	$\vec{R}$ (R)	newton	N
Longueur de référence		mètre	m
Masse	m	kilogramme	kg
Masse volumique	ρ	kilogramme par mètre cube	kg/m^3
Moment d'inertie par rapport à l'axe transversal de l'avion	B	kilogramme-mètre carré	$kg.m^2$
Moment résultant (composantes du) :			
moment de roulis	L	newton-mètre	Nm
moment de tangage	M	newton-mètre	Nm
moment de lacet	N	newton-mètre	Nm
Nombre de Froude	$\mathcal{F}$		
Nombre de Mach	M (ou $\mathcal{M}$)		
Nombre de Prandtl	$\mathcal{P}$		
Nombre de Reynolds	$\mathcal{R}$		
Pente de la trajectoire	γ	degré	°
Potentiel des vitesses	$\varphi(x, y)$	mètre carré par seconde	m^2/s
Poussée (résultante du système de forces de propulsion)	$\vec{F}(F)$	newton	N
Pression (pression statique)	p	newton par mètre carré ou pascal	N/m^2 ou Pa
Pression cinétique	$q = \rho V^2/2$	newton par mètre carré ou pascal	N/m^2 ou Pa
Pression d'arrêt (mesurée par un tube de Pitot)	p_p	newton par mètre carré ou pascal	N/m^2 ou Pa
Pression d'arrêt derrière un choc normal	p'_i	newton par mètre carré ou pascal	N/m^2 ou Pa
Pression génératrice	p_i	newton par mètre carré ou pascal	N/m^2 ou Pa
Rapport des chaleurs massiques d'un gaz	$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$		
Rotation instantanée	$\vec{\Omega}$ (Ω)	radian par seconde	rad/s
Surface	S	mètre carré	m^2
Température (absolue)	T	kelvin	K
Température génératrice	T_i	kelvin	K
Temps	t	seconde	s
Tension de cisaillement	τ	newton par mètre carré	N/m^2
Viscosité	μ (ou viscosité dynamique)	newton . seconde par mètre carré	$N.s/m^2$
Vitesse	$\vec{V}$ (V)	mètre par seconde	m/s

PRINCIPES

CHAPITRE PREMIER

AÉRODYNAMIQUE DES AVIONS ET DES MISSILES

1. OBJETS ET MÉTHODES DE L'AÉRODYNAMIQUE

1.1. Des faibles vitesses aux vitesses hypersoniques. — Lorsqu'un corps est en mouvement par rapport à l'air, il est soumis à des forces élémentaires de pression et de frottement qui s'exercent sur chaque élément de surface en contact avec le milieu extérieur. La réduction de ces forces élémentaires effectuée par rapport à un point du corps, arbitrairement choisi, conduit à une *force résultante* et à un *moment résultant*, pour toute orientation du corps par rapport à la vitesse du mouvement. La détermination des six composantes de ces deux grandeurs dans un trièdre approprié et celle des forces élémentaires font l'objet de l'aérodynamique.

De nombreux exemples peuvent être donnés en distinguant deux cas. Dans une première classe de problèmes, le *corps est fixe* et l'air en mouvement : bâtiments, ouvrages d'art. Dans une seconde classe de problèmes, le *corps est en mouvement* dans l'*air au repos*. C'est le cas de tous les véhicules se déplaçant au sol (automobiles, trains, etc.) ; les qualités aérodynamiques du véhicule conditionnent pour une large part, aux vitesses supérieures à 100 km/h, l'amélioration des performances, du confort et de la sécurité. Mais l'aérodynamique est évidemment déterminante dans le cas des véhicules aériens et spatiaux (dirigeables d'autrefois, avions de toutes catégories, hélicoptères, missiles balistiques ou pilotés, navettes spatiales futures, etc.) dont le vol comporte différentes phases avec des configurations appropriées.

Les deux classes de problèmes considérées ci-dessus ne sont d'ailleurs pas fondamentalement différentes puisque seul le *mouvement relatif* intervient. C'est ainsi, par exemple, qu'un avion se déplaçant à vitesse $\vec{V}$ constante, en module et direction, dans l'atmosphère au repos est soumis aux mêmes effets aérodynamiques que s'il était immobile dans une veine fluide dont toutes les particules seraient animées de la vitesse $\vec{V}$ (veine de vitesse uniforme).

Dans le cas des véhicules aériens, avions et missiles, auxquels ce chapitre est consacré, l'objet de l'aérodynamique est de prévoir les phénomènes locaux et globaux dans tous les cas de vol.

L'aérodynamique s'appuie sur un support théorique qui ne cesse de s'accroître par suite du progrès scientifique et des puissants moyens de calcul dont dispose le théoricien, y compris les méthodes analogiques. Mais il est souvent indispensable de considérer des formes géométriques simples et de recourir à des hypothèses simplificatrices concernant les propriétés du fluide *air*, assimilé à un milieu continu, dont le comportement thermodynamique et chimique est supposé obéir à certains modèles, plus ou moins complexes, selon les problèmes à traiter.

Bien que le développement des méthodes théoriques ait été considérable depuis plusieurs décennies, l'aérodynamicien doit faire largement appel à l'expérience pour vérifier ses prévisions et critiquer les hypothèses de base, mais aussi pour combler les lacunes de ses connaissances.

Les recherches théoriques et expérimentales, en perpétuelle évolution, visent à optimiser les solutions jusqu'alors adoptées ou à aborder des problèmes nouveaux du point de vue fondamental ou appliqué, en relation avec les programmes civils et militaires.

Au stade de l'avant-projet d'un avion, l'expérimentation doit être entreprise sur une *maquette*, modèle plus ou moins schématisé et à échelle réduite de l'avion, pour être poursuivie, au fur et à mesure du projet, sur des maquettes plus grandes et plus complètes, avec le système de propulsion représenté et, dans certains cas, aménagé de telle sorte que son fonctionnement puisse être simulé.

D'une manière générale, cette expérimentation est effectuée dans des souffleries aérodynamiques en respectant, s'il se peut, un ensemble de conditions de similitude. D'autres moyens, tubes à choc et tunnels de tir, sont également utilisés dans le cas des problèmes hypersoniques (missiles).

Le stade final de l'expérimentation est celui des *essais en vol*. Les méthodes modernes de mesure et l'acquisition des informations permettent de recueillir un nombre considérable de données dont le traitement est effectué en temps réel ou différé : un prototype d'avion ou de missile est un laboratoire volant qui, de plus, transmet au sol des résultats plus ou moins élaborés.

Nous examinerons dans ce chapitre les fondements de l'aérodynamique dans les différents domaines de vol, des basses vitesses aux vitesses hypersoniques, sur des cas simples : profils d'ailes, ailes, fuselages, corps de missile et sur des ensembles où des éléments se juxtaposent donnant lieu à des phénomènes réciproques connus sous le nom d'*interactions*.

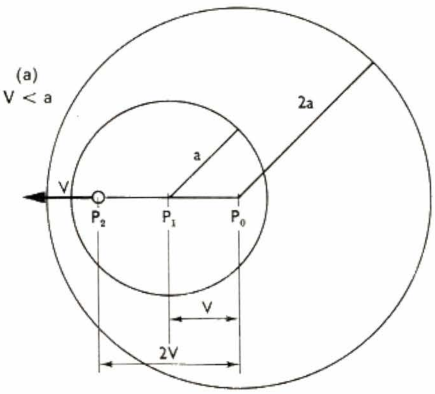
Des résultats généraux relatifs aux avions et aux missiles illustreront ce chapitre qui est, dans sa dernière partie, consacré aux moyens expérimentaux.

1.2. Principales étapes historiques. — L'aérodynamique est une science relativement récente puisque les premiers travaux théoriques remontent au XVIIIe siècle lorsque Bernoulli (1738) et Euler (1755) établissent les principaux théorèmes relatifs aux écoulements. Dans la première moitié du XIXe siècle, Navier (1823), Poisson (1831), de Saint-Venant (1843), Stokes (1845) introduisent les contraintes intérieures du fluide et obtiennent des lois fondamentales fort complexes et peu maniables à cette époque. Une étape importante est franchie à la fin du même siècle grâce à l'introduction des paramètres de similitude par Reynolds (1883) et Mach (1889) et aux travaux d'Hugoniot (1883) relatifs aux grandes vitesses qui intéressent les balisticiens de cette époque.

Sur le plan des applications, les phénomènes de portance sont prévus par Kutta (1902), Joukovski (1904) et Lanchester (1907) tandis que le concept de couche limite est introduit par Prandtl (1904) et Blasius (1907).

À la même époque, les travaux des pionniers de l'aviation Lilienthal, Ader, les frères Wright permettent de faire voler un avion. Parallèlement, les études expérimentales prennent un nouvel essor par l'essai en souffleries de maquettes, simultanément (1909) par Prandtl et par Eiffel dont a bénéficié très directement l'aviation militaire pendant la guerre mondiale de 1914-1918.

Depuis lors, des organismes de recherche aéronautique ont été créés, particulièrement en République fédérale allemande, en Grande-Bretagne, aux États-Unis d'Amérique, en France, en U.R.S.S. ; ils n'ont cessé de développer les travaux théoriques et expérimentaux dans tous les domaines de vitesses, depuis les hautes vitesses subsoniques jusqu'aux vitesses supersoniques. Les vitesses transsoniques (de part et d'autre de la vitesse du son) posent les problèmes les plus ardus, encore incomplètement résolus malgré d'importantes recherches effectuées dans les décennies 1950 à 1970.



Parallèlement, la réalisation de missiles à très grandes vitesses a provoqué des travaux considérables en hypersonique avec un apport expérimental très important pour simuler les effets physico-chimiques de l'air qui se produisent aux températures localement très élevées atteintes en vol.

2. NOTIONS FONDAMENTALES

2.1. Célérité du son — Nombre de Mach. — Le vocabulaire usuel utilisé ci-dessus souligne le rôle fondamental de la *célérité du son* symbolisée par *a* (plus couramment appelée vitesse du son) ; c'est la vitesse de propagation d'une perturbation infiniment faible créée dans l'air au repos. Cette perturbation ponctuelle, élémentaire, produite au temps $t = 0$ est à un instant t postérieur une onde sphérique dont le rayon est at.

Lorsque le point P, origine de la perturbation, est animé de la vitesse V par rapport au fluide au repos, deux cas sont à distinguer selon que le rapport $M = \frac{V}{a}$, appelé *nombre de Mach*, est inférieur ou supérieur à 1.

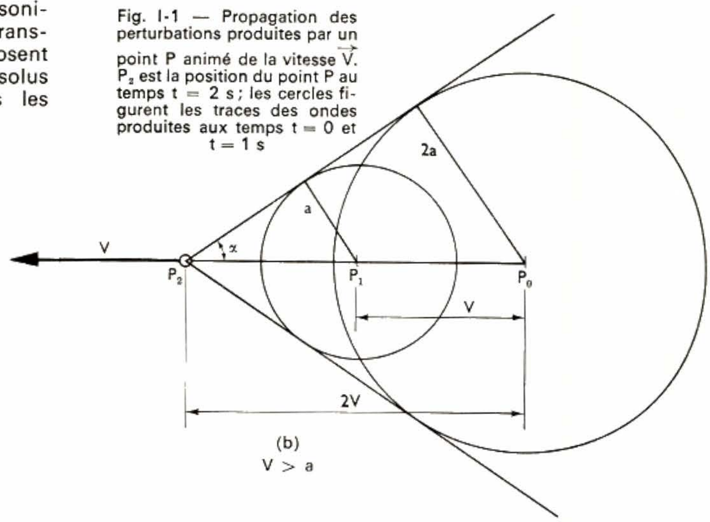
2.2. Effet d'une perturbation élémentaire en subsonique et en supersonique.

- $M < 1$: les perturbations produites par le point P devancent le mobile, intéressent tout l'espace, mais leur intensité diminue quand on s'éloigne du point (fig. I-1a).
- $M > 1$: les perturbations ne se font sentir que dans un domaine limité, dit *cône de Mach* (fig. I-1 b), ayant pour sommet le point P, pour axe la vitesse et pour demi-angle au sommet l'*angle de Mach* α, avec la relation : $\sin\alpha = \frac{a}{V} = \frac{1}{M}$.

Le cône de Mach est l'enveloppe des perturbations élémentaires qui s'ajoutent sur la surface.

Ainsi donc, le mobile produit dans le fluide ambiant des effets totalement différents selon que M est plus petit ou

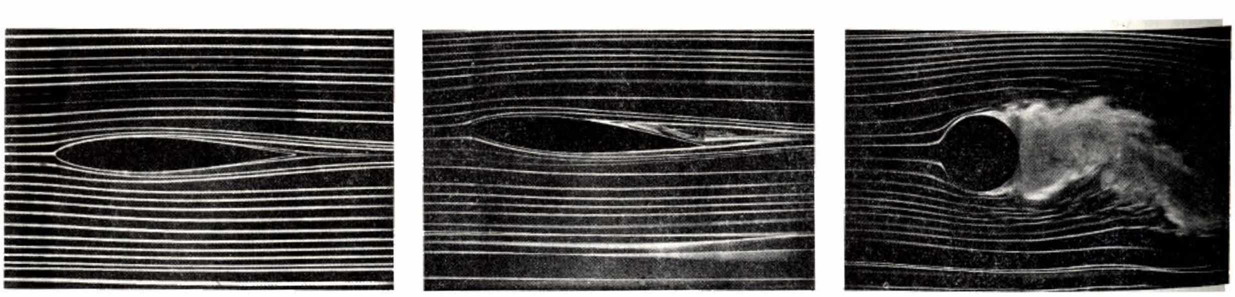
Fig. I-1 — Propagation des perturbations produites par un point P animé de la vitesse $\vec{V}$. P_2 est la position du point P au temps $t = 2$ s ; les cercles figurent les traces des ondes produites aux temps $t = 0$ et $t = 1$ s



plus grand que 1. Cette remarque à caractère physique permet de pressentir que les phénomènes de l'aérodynamique subsonique sont différents de ceux de l'aérodynamique supersonique, ce que traduira la nature des équations qui régissent ces phénomènes. À titre d'exemple, sur une aile d'avion, une perturbation engendrée par le braquage d'une gouverne (même si celle-ci est très petite) modifie l'écoulement sur toute l'envergure de l'aile en subsonique, tandis que le domaine perturbé est limité à la partie de l'aile influencée par les cônes de Mach de la gouverne en supersonique.

Lorsque la perturbation est finie, d'autres différences essentielles apparaissent : en supersonique il se produit des *ondes de choc* au travers desquelles le fluide subit une augmentation irréversible d'entropie.

Champ aérodynamique. Lorsque l'on étudie l'écoulement subsonique autour d'une tranche élémentaire d'une aile cylindrique (profil d'aile), soumise à un écoulement aérodynamique de vitesse uniforme $\vec{V_0}$ très loin du profil, les perturbations causées par le profil se font sentir en toutes directions et jusqu'à l'infini où elles tendent vers zéro. Ainsi, la vitesse locale $\vec{V}$ d'une particule fluide de l'écoulement dépend du point considéré. Aux variations de la



a) Profil d'aile, incidence nulle — b) Profil d'aile, incidence 5° — c) Cylindre

Fig. I-2 — Visualisations d'écoulements à faible vitesse par filets colorés émis à l'infini du corps (tunnel hydrodynamique de l'*O.N.E.R.A.*) $V_0 = 20$ cm/s

vitesse, correspondent des variations de la pression p, de la masse volumique ρ et de la température T. La vitesse $\overrightarrow{V_0}$ est appelée *vitesse à l'infini;* les grandeurs p_0, ρ_0, T_0 définissent l'*état du fluide à l'infini.*

L'ensemble des valeurs locales à un instant donné caractérise le *champ aérodynamique* autour du profil à cet instant.

Si ces valeurs ne dépendent pas du temps, l'écoulement est stationnaire (ou permanent) ; dans le cas contraire, il est instationnaire. Les phénomènes instationnaires peuvent être limités à certaines parties du champ aérodynamique.

La figure I-2 a montre une visualisation d'écoulement stationnaire autour d'un profil d'aile à incidence nulle : les *lignes de courant* tangentes en tout point au vecteur vitesse en ce point sont confondues avec les trajectoires des particules fluides ; on dit que l'écoulement s'effectue par filets. La figure I-2 b met en évidence un écoulement localement instationnaire dans un domaine d'écoulement décollé à l'extrados du profil quand l'incidence croît. La figure I-2 c relative à l'écoulement autour d'un cylindre dénote un écoulement instationnaire en aval du cylindre, dans les conditions de l'expérience.

Lorsque l'écoulement est supersonique, le domaine perturbé par le corps est limité à l'amont par une onde de choc (fig. I-3).

2.3. Air, fluide visqueux et conducteur. — Sur une surface élémentaire ds (fig. I-4 a), isolée par la pensée

$$dq = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\, ds\, dt$$

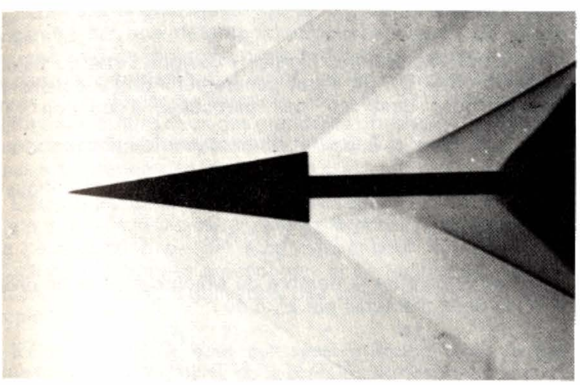
où λ est le coefficient de conduction thermique ou conductibilité thermique. Le flux de chaleur est $\varphi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}$ $\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right.$ désignant la dérivée partielle de la température par rapport à la variable y, qui permet de définir la position du point considéré).

Au voisinage de la paroi d'un corps plongé dans un écoulement, les gradients de vitesse sont grands puisque toute particule fluide a une vitesse nulle à la paroi. Il en résulte que les effets de la viscosité sont particulièrement importants au voisinage immédiat des parois, dans une épaisseur de fluide, appelée *couche limite.*

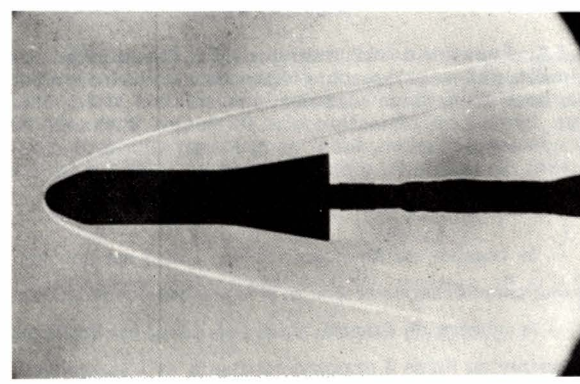
La force de frottement pariétale sur une surface ds (fig. I-4 b), est $\tau_p\, ds$; on lui associe un *coefficient de frottement local :*

$$C_f = \frac{\tau_p}{\frac{1}{2}\rho_e V_e^2}$$

où ρ_e et V_e sont respectivement les valeurs locales de la masse volumique et de la vitesse à l'*extérieur* de la couche limite. L'étude de la couche limite (V. § 2.8) permet de calculer les coefficients de frottement qui interviennent dans la résistance à l'avancement d'un corps et les flux de chaleur



Onde de choc conique attachée à une pointe : M = 1,9



Tête de missile, choc détaché : M = 10

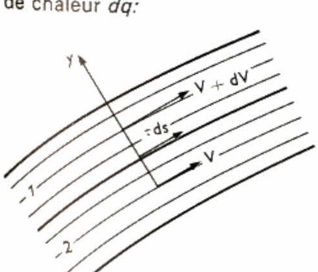
Fig. I-3 — Strioscopies (*O.N.E.R.A.*)

entre deux couches fluides animées de vitesses différentes, s'exerce une force tangentielle de viscosité, τds.

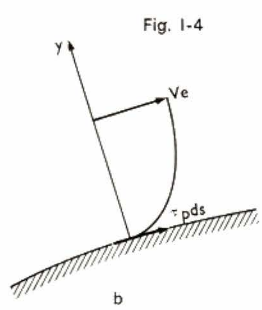
La tension unitaire τ (cisaillement) est proportionnelle au gradient normal de vitesse et au coefficient de viscosité μ, indépendant de la pression, mais fonction de la température absolue T ; pour les gaz, μ croît avec T (loi de Sutherland). L'action de cisaillement s'oppose à la déformation du fluide : la couche la plus rapide tend à accélérer la couche voisine plus lente.

D'après la théorie cinétique des gaz, la viscosité résulte d'un échange de quantités de mouvement à l'échelle moléculaire. À cet échange est lié également un transport de chaleur dq:

Fig. I-4



a La couche 1 exerce sur la couche 2 une force $\tau ds = \mu \frac{\partial V}{\partial y} ds$ qui tend à accélérer la couche 2



b Le fluide exerce sur la paroi une force de cisaillement $\tau_p ds$

qui conditionnent les températures pariétales (échauffement cinétique). À l'existence de la couche limite est dû le *phénomène de décollement* de l'écoulement qui cesse d'épouser la paroi du corps, modifiant ainsi les conditions aux limites.

Comme l'air est un fluide peu visqueux, une hypothèse simplificatrice consiste à considérer un fluide dénué de viscosité, dit *fluide parfait :* la contrainte de cisaillement et la conduction thermique sont nulles. Il en résulte une grande simplification des équations qui permettent de calculer certains types d'écoulements et d'obtenir des expressions explicites des forces aérodynamiques. Pour tenir compte de la viscosité du fluide, il faut ensuite effectuer un calcul de couche limite en utilisant les répartitions de vitesses sur le corps, obtenues en fluide non visqueux.

Cette façon de découpler les calculs, qui sont en réalité couplés, donne des résultats satisfaisants dans la plupart des applications usuelles.

2.4. Équation d'état du fluide : gaz parfait, gaz réel. — En aérodynamique classique, à l'exception des problèmes relatifs à la très haute atmosphère (altitude supérieure à 80 km), le fluide *air* peut être assimilé à un milieu continu : la pression p, la masse volumique ρ et la température T sont liées par une équation d'état. On est conduit le plus souvent à considérer l'air comme un *gaz parfait* obéissant aux lois de Mariotte et Gay-Lussac ; d'où la relation $\frac{p}{\rho} = RT$ où R est une constante qui dépend du gaz

et du système d'unités. Dans le système international (SI), pour l'air $R = 287{,}04$. Cette loi peut être utilisée dans le domaine de pressions et de températures que l'on rencontre en aéronautique lorsque la vitesse est inférieure à 2 000 km/h (à titre indicatif). Pour les vitesses très faibles, inférieures à 200 ou 300 km/h, une hypothèse simplificatrice, dont la validité est plus restreinte et doit être examinée avec soin, consiste à considérer l'air comme un *fluide incompressible :* $\rho = \text{Cte}$.

En revanche, aux vitesses très grandes, les variations locales de la vitesse dans le champ aérodynamique entraînent des variations de pression et de température telles que l'air s'écarte de la loi des gaz parfaits. Les effets de *gaz réel* sont accompagnés de réactions chimiques et d'effets électriques (ionisation). La figure I-5 résume les hypothèses utilisées.

ou sans choc :

$$\frac{V^2}{2} + h = \text{Cte} \tag{3}$$

(équation de l'énergie).

Une variation positive de vitesse sur un filet fluide produit une variation négative de la pression (quel que soit le nombre de Mach) et une variation négative de l'enthalpie spécifique h.

En intégrant (2) dans le cas du gaz calorifiquement parfait, en tenant compte de la relation isentropique $p/\rho^\gamma = \text{Cte}$ (où $\gamma = c_p/c_v$ est constant), on obtient :

$$\frac{V^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{p}{\rho} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{p_i}{\rho_i} = c_p T_i \tag{4}$$

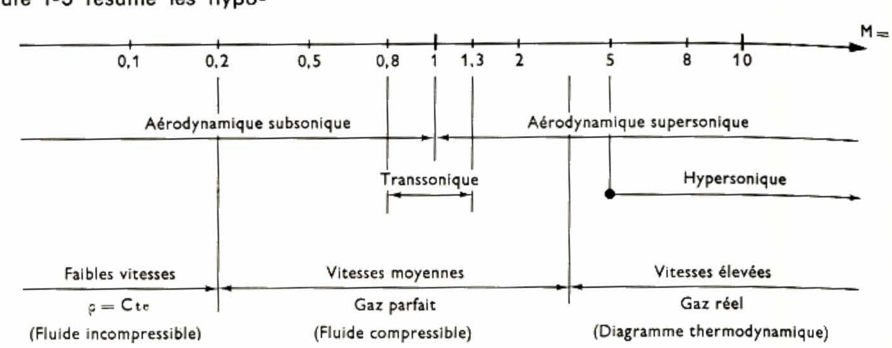


Fig. I-5

2.5. Équations du mouvement. Paramètres de similitude. — Les équations régissant le mouvement d'une particule d'un fluide visqueux peuvent être mises sous une forme non dimensionnelle en faisant intervenir les conditions à l'infini. Ainsi apparaissent plusieurs paramètres de similitude, sans dimension :

— le nombre de Mach : M (ou $\mathcal{M}$) $= \dfrac{V}{a}$ (V. § 2.1) ;

— le nombre de Reynolds : $\mathcal{R} = \dfrac{Vl}{\nu}$ où l est une longueur caractéristique et $\nu = \mu/\rho$, la viscosité cinématique ;

— le nombre de Prandtl : $\mathcal{P} = \dfrac{\mu c_p}{\lambda}$ où c_p est la chaleur massique du fluide à pression constante, et λ la conductibilité thermique (V. § 2.3) ;

— le nombre de Froude : $\mathcal{F} = \dfrac{V}{\sqrt{l g}}$ où g est l'accélération de la pesanteur.

Pour l'air, les forces de pesanteur peuvent être négligées ; le nombre de Froude n'est pas à considérer.

Le nombre de Prandtl ne dépend que du fluide considéré ; il intervient dans les problèmes thermiques.

Les paramètres de similitude les plus importants sont le nombre de Mach et le nombre de Reynolds. Aux faibles vitesses le nombre de Mach est pratiquement sans effet, mais l'influence du nombre de Reynolds est importante. Aux vitesses supersoniques, le nombre de Mach est déterminant.

2.6. Équations des écoulements monodimensionnels isentropiques. — Il s'agit des relations qui relient sur un filet fluide les grandeurs physiques à la vitesse ou au nombre de Mach.

Si S désigne l'aire de la section d'un filet élémentaire en mouvement permanent (vitesse V, masse volumique ρ) :

$$\rho S V = \text{Cte} \tag{1}$$

(conservation de la masse, équation de continuité).

La mécanique des fluides fournit, de plus, dans le cas d'un écoulement permanent, réversible et continu (fluide parfait, pas de choc), en négligeant les forces de masse, l'équation :

$$V dV + \frac{dp}{\rho} = 0 \tag{2}$$

(équation des quantités de mouvement),

Une équation plus générale régit l'écoulement permanent et adiabatique d'un fluide parfait ou visqueux, avec

Dans ces expressions, l'indice i désigne l'état du fluide au repos ($V = 0$), dit « état générateur » de l'écoulement. Notons que, dans ce cas particulier, l'équation (3) $\dfrac{V^2}{2} + h = h_i = c_p T_i$ fournit directement la même relation.

La vitesse du son (V. 2.1) s'écrit pour le gaz calorifiquement parfait : $a = \sqrt{\gamma \dfrac{p}{\rho}} = \sqrt{\gamma R T}$.

On fait apparaître le nombre de Mach dans (4) en divisant les deux membres par a^2, d'où :

$$\frac{M^2}{2} + \frac{1}{\gamma - 1} = \frac{1}{\gamma - 1}\frac{p_i}{p}\cdot\frac{\rho}{\rho_i}$$

et en ne conservant que le rapport des pressions :

$$\frac{p}{p_i} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \tag{5}$$

ou encore avec le rapport des masses volumiques :

$$\frac{\rho}{\rho_i} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-\frac{1}{\gamma - 1}} \tag{6}$$

et encore :

$$\frac{T}{T_i} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-1} \tag{7}$$

Ces trois dernières expressions qui relient les rapports de pression, de masse volumique et de température au nombre de Mach sont les *relations fondamentales des écoulements monodimensionnels isentropiques*. Elles sont tabulées pour différentes valeurs de γ. Pour l'air, $\gamma = 1{,}4$ (fig. I-6).

Des valeurs comprises entre 1,2 et 1,4 sont adoptées pour les gaz de combustion des réacteurs ou des fusées (problèmes d'écoulements dans les tuyères propulsives des avions ou des missiles).

Observation fondamentale. Étant donné les hypothèses formulées au début de ce paragraphe, les relations (5), (6), (7) ne sont pas applicables dans les régions de l'écoulement où la viscosité du fluide est déterminante : couche limite, sillage, etc. Elles sont applicables à un filet fluide dans la majeure partie du champ aérodynamique (où l'écoulement est stationnaire et les forces de viscosité négligeables), à condition que le filet considéré ne traverse pas un choc.

Fig. I-6

Fac-similé d'une page d'une table d'écoulements $0,01 < M < 100$ $\gamma = 1,4$

(Éd. École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace)

M	$\frac{p}{p_i}$	$\frac{\rho}{\rho_i}$	$\frac{T}{T_i}$	$\frac{V}{a_c}$	$\frac{\rho V^2}{2p_i}$	$\frac{A}{A_c}$	$\omega°$	$\alpha°$
1,80	0,1740	0,2868	0,6068	1,53598	0,3947	1,439	20,725	33,75
,81	,1714	,2837	,6041	,54114	,3931	,450	21,014	33,54
,82	,1688	,2806	,6015	,54626	,3914	,461	21,302	33,33
,83	,1662	,2776	,5989	,55136	,3897	,472	21,590	33,12
	[illegible]	,2745	,5963	,55642	,3879	[illegible]		

Écoulement isentropique

M_{n0}	$\frac{p_{i1}}{p_{i0}}$	$\frac{p_1}{p_0}$	$\frac{\rho_1}{\rho_0}$	$\frac{T_1}{T_0}$	M_{n1}	$\frac{p_1}{p_{i1}}$
1,80	0,8127	3,613	2,359	1,532	0,6165	0,7738
,81	,8082	,655	,375	,539	,6143	,7752
,82	,8038	,698	,391	,547	,6121	,7765
,83	,7993	,740	,407	,554	,6099	,7779
,84	,7948	,783	,422	[illegible]		[illegible]

Écoulement avec choc. La dernière colonne de droite n'est pas valable pour le choc oblique (V. § 2.7.2)

Applications

1° *L'état générateur* peut être réel ou fictif. Le premier cas est celui des écoulements isentropiques partant du repos : les conditions génératrices sont les mêmes sur tous les filets. Ainsi un écoulement de vitesse uniforme V_0, conditions physiques p_0, ρ_0, T_0 connues, peut être engendré par une détente isentropique à partir du fluide au repos. Connaissant T_0, nous déduisons la vitesse du son a_0 dans cet écoulement, d'où M_0, et les conditions génératrices p_i, ρ_i, T_i par les formules (5), (6), (7). Notons qu'il suffit de connaître deux des grandeurs physiques (généralement pression et température), puisque la troisième grandeur est obtenue par l'équation d'état.

L'état générateur p_i, ρ_i, T_i peut être fictif si le fluide n'a pas atteint la vitesse V_0 par un processus isentropique. La considération de cet état « générateur fictif » permet d'utiliser les formules précédentes et de faciliter les calculs d'écoulements par l'utilisation des tables de détente isentropique.

L'état générateur fictif est aussi introduit dans le cas d'un avion en vol, à partir de la pression atmosphérique p_z et de la température T_z, à l'altitude z de vol au nombre de Mach M_0.

2° La *relation* (5) montre que si un écoulement M_0 issu d'un état générateur p_i, ρ_i, T_i revient au repos par un processus isentropique, il reprend les mêmes valeurs p_i, ρ_i, T_i (fig. I-7 a).

L'arrêt local du fluide en un point d'un corps plongé dans l'écoulement doit être examiné avec précaution : si cet arrêt est isentropique, les valeurs locales à l'arrêt sont encore p_i, ρ_i, T_i (fig. I-7 b) ; pour qu'il en soit ainsi, il faut que le nombre de Mach avant l'arrêt soit subsonique. Dans le cas contraire, $M_0 > 1$, l'arrêt local (fig. I-7 c), est précédé d'un choc : la pression p'_i et la masse volumique ρ'_i au point d'arrêt sont respectivement plus faibles que p_i et ρ_i : elles sont calculables par les équations des écoulements avec onde de choc ; ces équations montrent toutefois que la température d'arrêt reste égale à T_i (cela résulte de l'équation (3) qui est générale).

3° *Cas des faibles vitesses* (*faibles Mach*). L'expression qui relie la pression génératrice p_i (égale à la pression d'arrêt) à la pression p (dénommée pression *statique* s'il est nécessaire pour éviter une confusion) est obtenue par le développement en série en fonction des puissances du nombre de Mach de la formule (5) :

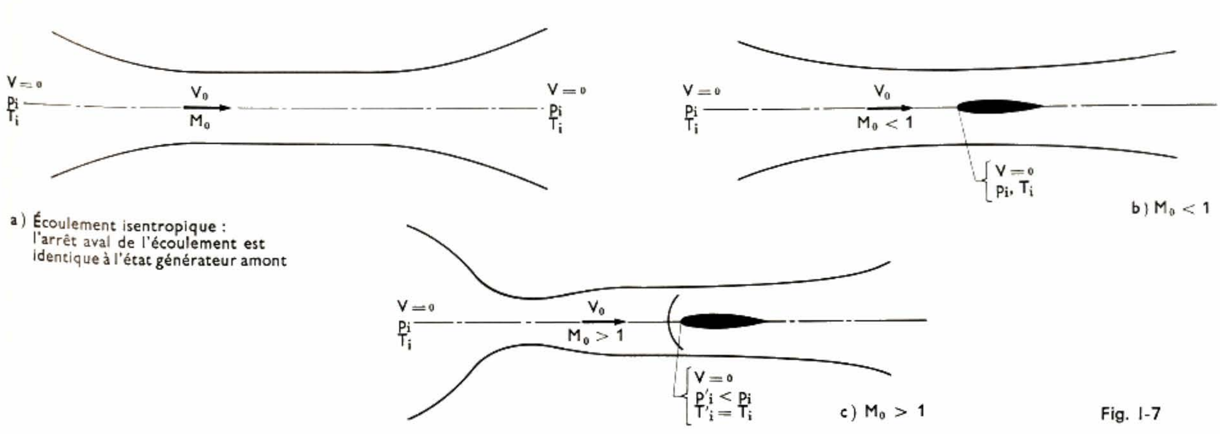
$$p_i = p\left[1 + \frac{\gamma}{2}M^2 + \frac{\gamma}{8}M^4 + \gamma\left(\frac{2-\gamma}{48}\right)M^6 + \ldots\right]$$

Remarquons que $\frac{\gamma}{2}pM^2 = \frac{\rho}{2}V^2$, puisque $a^2 = \gamma\frac{p}{\rho}$ (V. § 2.6) ; ce terme est appelé *pression cinétique*.

Par suite :

$$p_i = p + \frac{\rho V^2}{2} + \frac{\rho V^2}{2}\left(\frac{M^2}{4} + \frac{2-\gamma}{24}M^4 + \ldots\right)$$

Si, pour les faibles valeurs du nombre de Mach, nous négligeons le troisième terme du second membre, nous obtenons : $p_i = p + \frac{\rho V^2}{2}$, expression connue traduisant le *théorème de Bernoulli :* la pression génératrice égale à la pression d'arrêt est la somme de la pression statique et de la pression cinétique. Cette relation, *applicable aux fluides incompressibles*, est d'ailleurs obtenue directement en intégrant (2) avec ρ = Cte.



a) Écoulement isentropique : l'arrêt aval de l'écoulement est identique à l'état générateur amont

b) $M_0 < 1$

c) $M_0 > 1$

Fig. I-7

La relation (6) conduit au développement en série suivant :

$$\rho_i = \rho\left(1 + \frac{M^2}{2} + \frac{2-\gamma}{8}M^4 + \dots\right)$$

Elle montre que la variation de ρ peut être effectivement négligée pour les faibles valeurs de M. Ainsi $\frac{\rho_i - \rho}{\rho} = 0{,}5\ \%$ pour $M = 0{,}1$ et $2\ \%$ pour $M = 0{,}2$.

Les vitesses correspondantes dépendent du gaz et de la température de l'écoulement. Dans l'*air* à $t = 15\ °C$, soit $T = 273 + 15 = 288$ K, la vitesse du son est :

$$a = \sqrt{\gamma RT} = 20{,}05\sqrt{T} = 340\ \text{m/s};$$

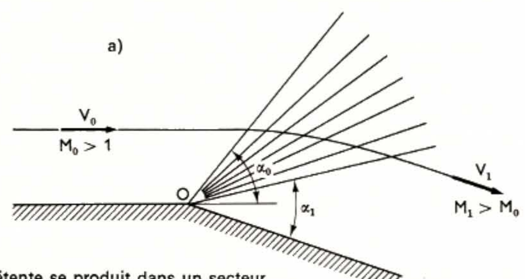
pour $M = 0{,}1 \longrightarrow V = 34$ m/s

pour $M = 0{,}2 \longrightarrow V = 68$ m/s

La vitesse du son dans l'air varie avec l'altitude (exemple : $a = 300$ m/s à 10 000 mètres, car $T = 223$ K en atmosphère type).

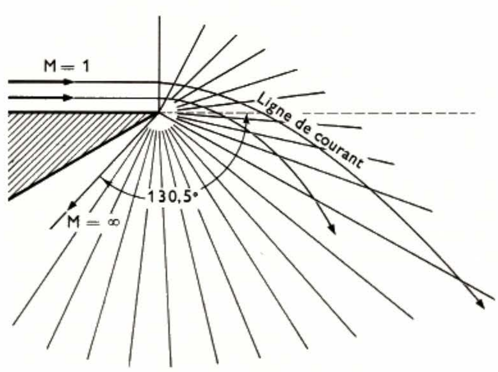
Elle dépend de la température, mais aussi de la nature du gaz, par γ et R (à titre indicatif dans un jet de réacteur, la vitesse du son est voisine de 600 m/s).

4° *Détente isentropique centrée.* En écoulement amont supersonique, lorsqu'une paroi présente une déviation angulaire finie autour d'une arête saillante, elle donne lieu à une détente centrée autour de cette arête : ce phénomène isentropique accessible au calcul en fluide parfait est appelé *détente de Prandtl-Meyer* (fig. I-8 a).



La détente se produit dans un secteur angulaire défini par les angles de Mach α_0 et α_1

Exemple : $M_0 = 1{,}82$ déviation 10° $\alpha_0 = 33{,}33°$
$M_1 = 2{,}18$ $\alpha_1 = 27{,}30°$



b)

Fig. I-8

Détente centrée « poussée jusqu'au vide » : la vitesse tend vers une valeur limite, le nombre de Mach tend vers l'infini

Sur tous les filets fluides qui contournent l'arête, la vitesse subit une série de déviations élémentaires autour de lignes de Mach issues de l'arête O ; corrélativement la vitesse croît, la pression, la température, la masse volumique décroissent. Le nombre de Mach M_1 de l'écoulement sur la seconde face du dièdre est supérieur à M_0.

Si l'on introduit l'état générateur de l'écoulement, les grandeurs physiques du fluide satisfont aux équations (5), (6), (7) dans l'état initial M_0 et dans l'état final M_1.

Lorsque la détente est poussée (théoriquement) jusqu'au vide (fig. I-8 b), la déviation depuis $M = 1$ est maximale et égale à 130° environ, pour l'air ($\gamma = 1{,}4$).

L'existence d'une couche limite ne modifie pas le phénomène extérieur à la couche limite, mais la couche limite se trouve amincie dans la détente et peut même, de turbulente, redevenir laminaire (V. § 2.8).

2.7. Écoulements par filets avec choc. — Nous savons qu'une perturbation finie dans un écoulement supersonique engendre une onde de choc attachée sur un corps à bord d'attaque pointu et une onde de choc détachée si le bord d'attaque est arrondi. Pour le filet fluide qui aboutit au point d'arrêt, la traversée du choc peut être assimilée à celle d'un choc normal au filet, c'est-à-dire à la vitesse locale. D'autres phénomènes, en particulier dans l'aérodynamique des ailes en transsonique, donnent lieu à des chocs normaux ou obliques en écoulements bidimensionnels (V. § 3.4).

2.7.1. Choc normal. — Les propriétés du choc normal sont établies en mouvement permanent, fluide parfait, forces de masse négligées, à partir des équations de continuité, de quantité de mouvement et de l'énergie. Le choc normal d'épaisseur théoriquement nulle (en fluide réel, épaisseur excessivement faible) donne lieu à une discontinuité de la vitesse et des grandeurs physiques du fluide.

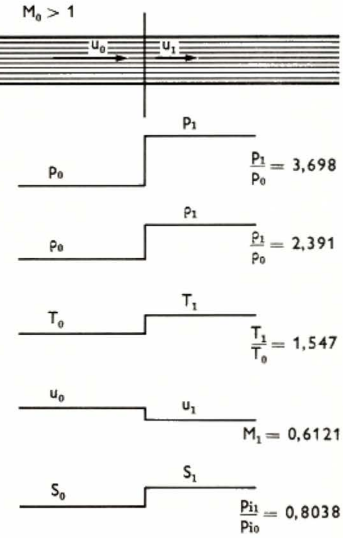


Fig. I-9

Choc normal. Exemple : $M_0 = 1{,}82$ (V. table de la figure I-6)

À la traversée du choc (fig. I-9), la vitesse décroît sans changer de direction ; pression, masse volumique, température croissent ainsi que l'entropie S du fluide. Le choc introduit donc une irréversibilité dans l'écoulement : un écoulement de sens inverse qui correspondrait à une détente discontinue est impossible thermodynamiquement.

Le calcul explicité pour le gaz parfait montre que les rapports $\frac{p_1}{p_0}$, $\frac{\rho_1}{\rho_0}$, $\frac{T_1}{T_0}$ ne dépendent que de γ et du nombre de Mach amont M_0. Ces rapports qui croissent rapidement avec M_0 sont tabulés pour différentes valeurs de γ (V. fig. I-6). De plus, résultat fort important, le nombre de Mach M_1 de l'écoulement aval est *subsonique* : ainsi un choc normal fait nécessairement passer d'un écoulement supersonique à un écoulement subsonique.

L'arrêt du fluide (fig. I-10), isentropique sur la partie du filet en aval du choc, conduit (V. § 2.6) aux conditions d'arrêt p'_i, ρ'_i et $T'_i = T_i$.

Comme $\frac{p_i}{\rho_i} = RT_i = \frac{p'_i}{\rho'_i}$ il vient : $\frac{p'_i}{p_i} = \frac{\rho'_i}{\rho_i}$.

Ce rapport est une fonction de γ et de M_0 ; il décroît rapidement avec M_0 $\left(\frac{p'_i}{p_i}\ \text{noté}\ \frac{p_{i1}}{p_{i0}},\ \text{V. fig. I-6}\right)$. Ce résultat a des conséquences très néfastes sous l'angle des applications : aérodynamique des profils d'aile et des orifices de captation (prises d'air des réacteurs où il faut éviter la présence de chocs normaux ; V. § 5.6).

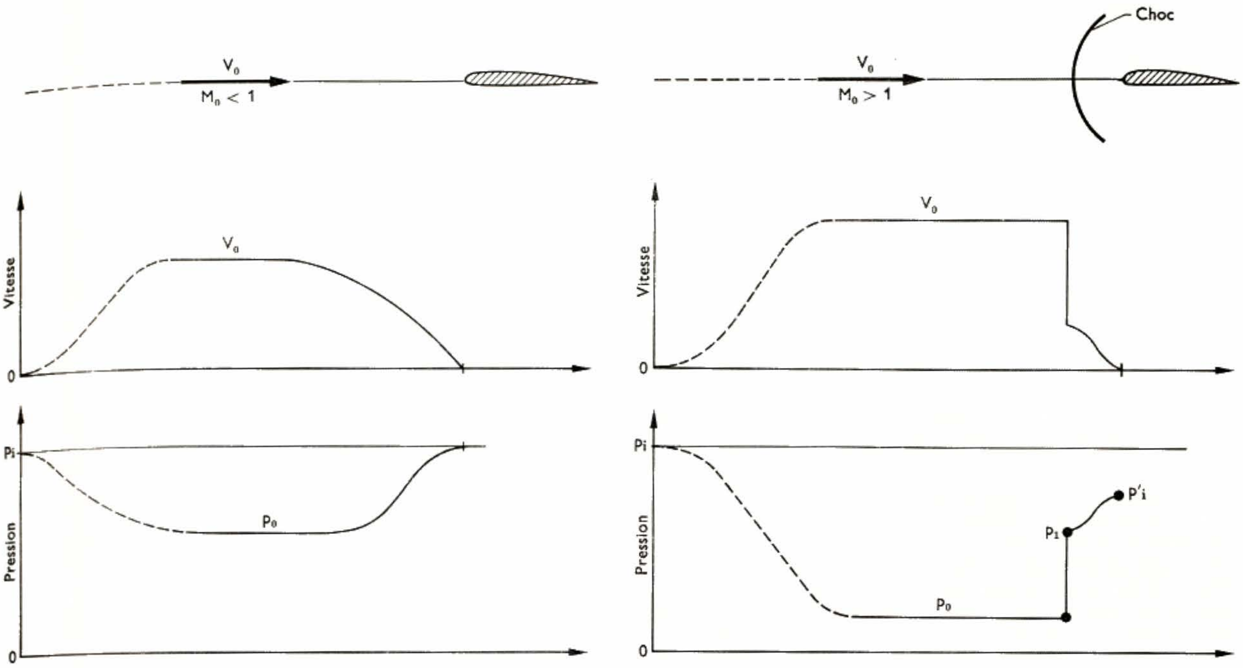
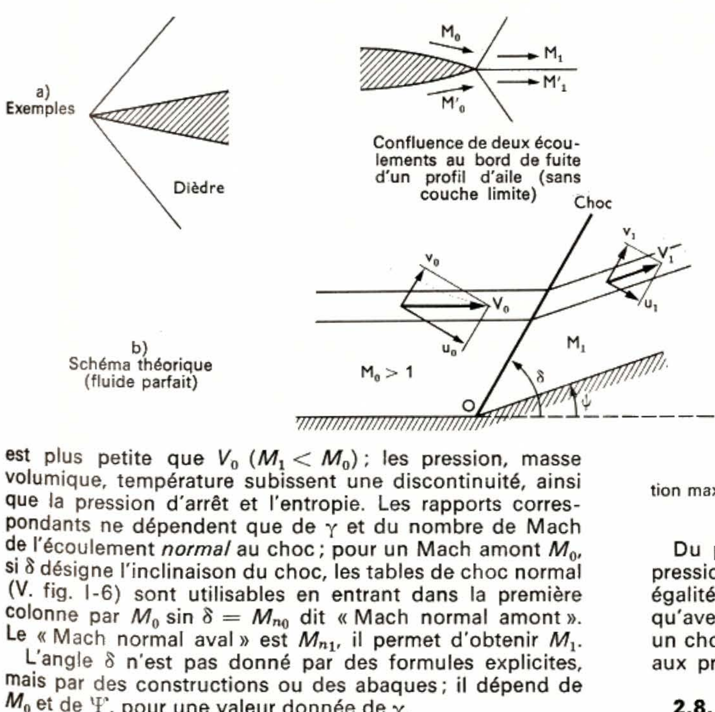


Fig. I-10 — Diagrammes de l'arrêt d'un filet fluide sur un corps

2.7.2. Choc oblique. — Le phénomène de choc oblique se rencontre lorsqu'un écoulement supersonique subit une déviation Ψ, soit par une paroi, soit dans les problèmes de confluence d'écoulements (fig. I-11 a).

L'onde de choc oblique (fig. I-11 b), sépare l'écoulement en deux domaines uniformes: la vitesse amont V_0 subit à la traversée du choc une variation en module et en direction d'angle Ψ. Le calcul montre que la vitesse aval V_1



est plus petite que V_0 ($M_1 < M_0$) ; les pression, masse volumique, température subissent une discontinuité, ainsi que la pression d'arrêt et l'entropie. Les rapports correspondants ne dépendent que de γ et du nombre de Mach de l'écoulement *normal* au choc ; pour un Mach amont M_0, si δ désigne l'inclinaison du choc, les tables de choc normal (V. fig. I-6) sont utilisables en entrant dans la première colonne par $M_0 \sin \delta = M_{n0}$ dit « Mach normal amont ». Le « Mach normal aval » est M_{n1}, il permet d'obtenir M_1.

L'angle δ n'est pas donné par des formules explicites, mais par des constructions ou des abaques ; il dépend de M_0 et de Ψ, pour une valeur donnée de γ.

Deux propriétés fondamentales doivent être soulignées :

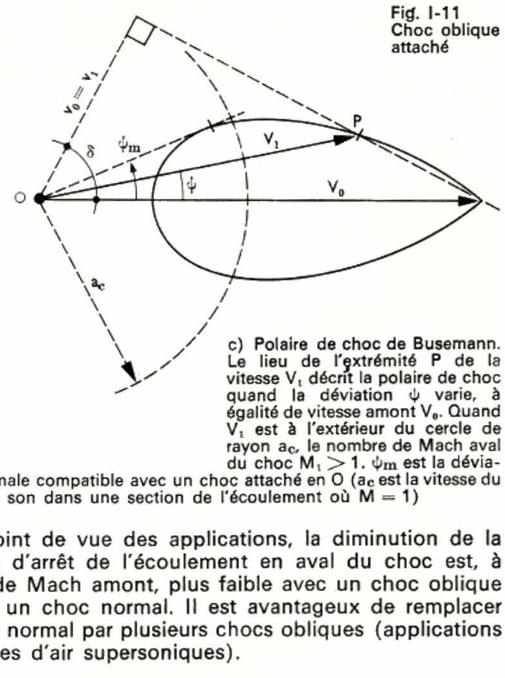
— le choc oblique plan ne peut être obtenu que si la déviation Ψ est inférieure à une valeur maximale Ψ_m qui dépend de M_0 (elle varie de 0 à 45° environ quand M_0 varie de 1 à l'infini) ;

— le Mach aval M_1 peut être supersonique ou subsonique.

Ces deux propriétés, très bien vérifiées expérimentalement, sont mises en évidence par la *polaire de choc de Busemann* (fig. I-11 c) qui interprète géométriquement les relations du choc oblique.

Dans les cas usuels, l'aval du choc oblique est supersonique, mais il existe pour chaque nombre de Mach M_0 un petit domaine angulaire de déviation, très voisin de Ψ_m, pour lequel M_1 est subsonique.

Fig. I-11
Choc oblique attaché



c) Polaire de choc de Busemann. Le lieu de l'extrémité P de la vitesse V_1 décrit la polaire de choc quand la déviation ψ varie, à égalité de vitesse amont V_0. Quand V_1 est à l'extérieur du cercle de rayon a_c, le nombre de Mach aval du choc $M_1 > 1$. ψ_m est la déviation maximale compatible avec un choc attaché en O (a_c est la vitesse du son dans une section de l'écoulement où $M = 1$)

Du point de vue des applications, la diminution de la pression d'arrêt de l'écoulement en aval du choc est, à égalité de Mach amont, plus faible avec un choc oblique qu'avec un choc normal. Il est avantageux de remplacer un choc normal par plusieurs chocs obliques (applications aux prises d'air supersoniques).

2.8. Couche limite — Décollement et recollement. On désigne par couche limite la faible épaisseur de fluide qui est au contact des parois d'un corps plongé dans un écoulement et dans laquelle la viscosité joue un rôle prépondérant. Force de cisaillement et conduction de chaleur (V. § 2.3) y sont associées ; elles engendrent les forces de frottement pariétales et les flux de chaleur : ces

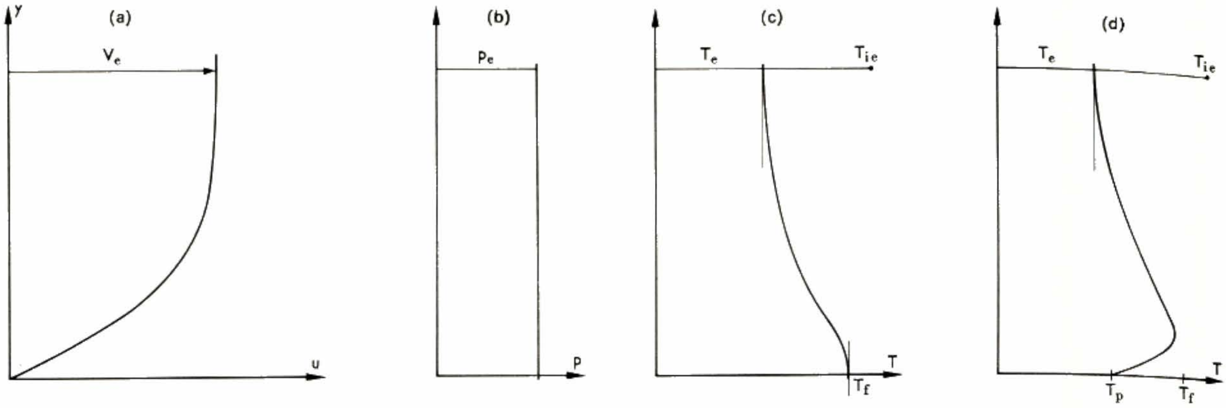


Fig. I-12 — a) Profil des vitesses dans la couche limite. — b) Profil des pressions dans la couche limite. — c) Profil des températures « paroi athermane ». — d) Profil des températures « paroi refroidie » $T_p < T_f < T_{ie}$ (T_{ie} est la température d'arrêt de l'écoulement extérieur $T_{ie} - T_e = \frac{V_e^2}{2c_p}$)

deux aspects dynamique et thermique sont inséparables, mais les effets thermiques sont surtout importants aux grandes vitesses.

L'aspect dynamique se traduit par le *profil des vitesses* (fig. I-12 a), variation progressive de la vitesse dans l'épaisseur de la couche limite : vitesse nulle à la paroi, vitesse égale à celle de l'écoulement extérieur V_e dans la tranche considérée. En revanche, la pression est constante dans la traversée de la couche limite : cette propriété fondamentale (fig. I-12 b) prévue par la théorie est bien vérifiée expérimentalement. De plus, par la réduction du débit qu'elle provoque, la couche limite a un *effet de déplacement :* tout se passe comme si, pour le fluide parfait extérieur, le corps était épaissi d'une certaine quantité dite épaisseur de déplacement ; cet effet est particulièrement important en hypersonique. Enfin, l'écoulement dans la couche limite est rotationnel ; tourbillons d'axes perpendiculaires au plan de la figure I-12, dont les intensités sont liées aux gradients normaux de vitesse.

L'aspect thermique est caractérisé par le *profil des températures*. Pour une température T_e de l'écoulement extérieur, la température de la paroi dépend de la nature de celle-ci. La paroi peut-être *athermane* (imperméable à la chaleur), dans ce cas, elle prend une température d'équilibre T_f (fig. I-12 c) dite *température de frottement*, sous l'effet de la chaleur produite par le travail des forces de frottement et évacuée par conduction du fluide. Dans un autre cas (fig. I-12 d) la *température de paroi* T_p est imposée avec $T_p < T_f$ (paroi refroidie par une installation appropriée pour un avion en régime permanent de vol ; paroi refroidie en régime transitoire sur un missile par « effet de puits », ou par ablation d'un bouclier). Notons que pour $y = 0$, $\partial T/\partial y = 0$ pour la paroi athermane, tandis que pour la paroi refroidie $\partial T/\partial y > 0$ correspond à un flux de chaleur pariétal dans le sens fluide-paroi. Le profil de température définit le profil de masse volumique ρ.

2.8.1. Nature de la couche limite — Phénomène de transition. — Quand on mesure les fluctuations de la vitesse en fonction du temps en un point d'une couche limite, on constate qu'elles sont faibles (auquel cas l'écoulement dit *laminaire* est considéré comme permanent) ou qu'elles sont très importantes, irrégulières en module et direction, se superposant à un écoulement moyen permanent (écoulement *turbulent*). Il convient de distinguer la *couche limite laminaire* et la *couche limite turbulente.*

Les théories de la couche limite laminaire reposent sur les équations de Navier-Stokes. Les équations locales ont été obtenues par Blasius à partir d'une simplification (due à Prandtl) des équations et avec des hypothèses de similitude sur le profil des vitesses, dans le cas d'une plaque plane parallèle à la vitesse à l'infini (gradient de pression $\partial p/\partial x$ nul) et en fluide incompressible. Des généralisations ont été faites au cas d'un gradient de pression différent de zéro. Elles ont mis en évidence l'évolution du profil des vitesses pouvant conduire au *décollement de la couche limite*. Les méthodes de calcul numérique utilisant les ordinateurs permettent de traiter les équations exactes de la couche limite et d'effectuer des calculs dans les cas où les équations de Prandtl ne sont pas justifiées (couche limite sur le bord d'attaque). L'extension au fluide compressible apporte des complications et nécessite l'utilisation d'ordinateurs.

La théorie de la couche limite turbulente est beaucoup moins avancée : la nature aléatoire des fluctuations de vitesse ne permet pas de relier leurs corrélations au mouvement moyen. Prandtl et Karman ont dû recourir à des schémas relativement empiriques et à des hypothèses de similitude, avec des constantes fournies par des résultats expérimentaux pour établir les formules usuelles de la plaque plane en fluide incompressible. Sur le plan des applications, ces formules se sont révélées très utiles ainsi que leur extension en compressible.

Des méthodes globales intégrales, permettant de calculer en chaque point de l'abscisse d'une couche limite laminaire ou turbulente le coefficient de frottement et le flux de chaleur, sont couramment utilisées, en tenant compte de la répartition de pression en l'absence de couche limite (elle est obtenue par un calcul, ou déterminée expérimentalement).

Dans l'état actuel de la question, on peut calculer avec une assez bonne précision le développement d'une couche limite laminaire sur la paroi d'une aile en écoulement bidimensionnel depuis l'origine amont (point d'arrêt), et en déduire l'évolution du coefficient de frottement et du flux de chaleur en fonction de l'abscisse. Sur des ailes d'envergure limitée et en flèche, des effets latéraux (tridimensionnels) apportent de sérieuses complications. Dans le cas d'une couche limite turbulente, les mêmes calculs sont effectués, mais la précision est encore souvent insuffisante pour les raisons fondamentales indiquées plus haut.

Dans tous les cas, une difficulté apparaît : une couche limite laminaire ne peut conserver son caractère laminaire ; au bout d'un certain parcours, elle présente un caractère d'instabilité caractérisé par le fait que les perturbations qui peuvent se produire ne s'amortissent plus. Il en résulte une évolution des caractéristiques de la couche limite sur une longueur dite *zone de transition* (fig. I-13 a), après quoi la couche limite présente les particularités d'une couche limite turbulente.

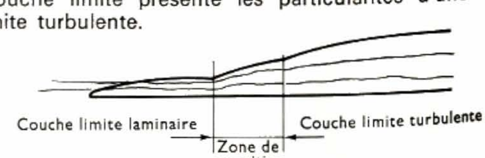
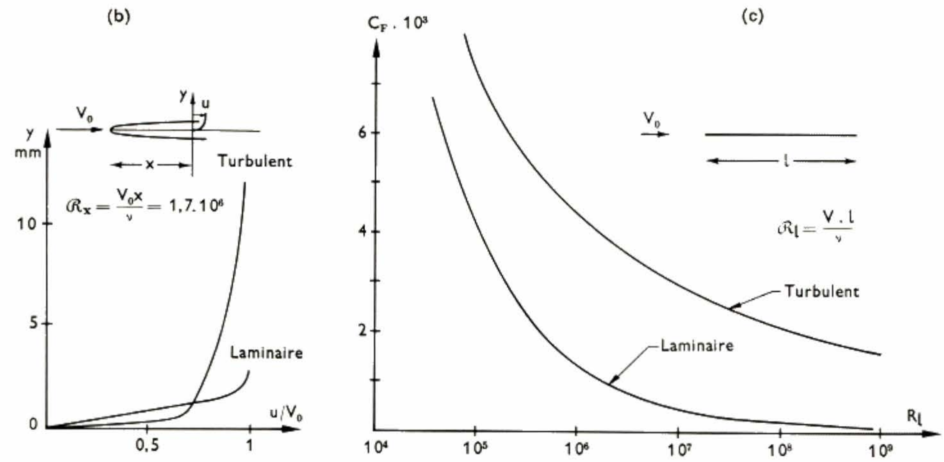


Fig. I-13 a

On peut caractériser cette zone de transition par les nombres de Reynolds calculés avec les abscisses du début et de la fin de la transition. Plus simplement, on peut schématiser le phénomène et introduire un *point de transition* d'abscisse x_T et le nombre de Reynolds correspondant $\mathcal{R}_{xT}$. Dans un calcul de couche limite il faut donc connaître la position du point de transition. Différents critères sont utilisés à cet effet. Le nombre de Reynolds de transition dépend de nombreux facteurs physiques : préturbulence

Fig. I-13 b et c



de l'écoulement amont, rugosité de la paroi, gradient longitudinal de pression $\partial p/\partial x$, flux de chaleur à la paroi et des nombres de Reynolds et de Mach. L'influence du gradient longitudinal doit être soulignée : une couche limite laminaire résiste mal à un gradient de pression positif ; à l'incidence de vol choisie, la géométrie du profil peut être calculée pour présenter une évolution favorable des pressions (profils laminaires). Dans les conditions les plus favorables, le nombre de Reynolds de transition n'excède pas 3.10^6, pour les applications aéronautiques. Il en résulte que la couche limite est turbulente sur la majeure partie d'une aile d'avion en vol étant donné les grands nombres de Reynolds de vol (de plusieurs dizaines de millions à une ou deux centaines de millions). La situation est différente pour des missiles en altitude, étant donné la petitesse relative des nombres de Reynolds due à la grande viscosité cinématique.

2.8.2. Résultats fondamentaux — Plaque plane sans gradient de pression, fluide incompressible. La vitesse est constante à l'extérieur de la couche limite $V_e = V_0$.

Pour une couche limite laminaire, il résulte des hypothèses de similitude que la frontière de la couche limite, définie par la distance à laquelle $u/V_0 = 0,99$, est une parabole : l'épaisseur conventionnelle δ de la couche limite à la distance x du bord d'attaque est donnée par $\frac{\delta}{x} = \frac{4,92}{\mathcal{R}_x^{1/2}}$, où $\mathcal{R}_x = \frac{V_0 x}{\nu}$ est le nombre de Reynolds à l'abscisse x. L'épaisseur d'une couche limite peut varier sur un avion entre 1 cm et 10 cm (à titre tout à fait indicatif, pour situer le problème).

Le profil de vitesse est invariant dans les coordonnées u/V_0 et $\frac{y}{x}\sqrt{\mathcal{R}_x}$; il est remarquablement vérifié par l'expérience, avec une croissance très progressive de la vitesse (fig. I-13 b). Le coefficient de frottement local est $C_f = \frac{0,664}{\mathcal{R}_x^{1/2}}$. Pour une couche limite turbulente, le profil de vitesse est différent, caractérisé par une croissance très rapide de la vitesse (dans la partie inférieure de la couche limite par suite des échanges macroscopiques de quantités de mouvement dus aux vitesses d'agitation) et une croissance beaucoup plus lente dans la partie supérieure. Le coefficient de frottement pariétal local est, par suite, beaucoup plus grand qu'en laminaire ; on adopte généralement la relation : $C_f = \frac{0,0368}{\mathcal{R}_x^{1/6}}$.

L'intégrale du coefficient de frottement local donne le *coefficient de frottement moyen* C_F qui est lié à la force de frottement X_f exercée par le fluide sur la plaque (une face) :

$$X_f = C_F \cdot \frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S$$

par suite :

$C_F = \frac{1,328}{\mathcal{R}_l^{1/2}}$ en laminaire, $C_F = \frac{0,0442}{\mathcal{R}_l^{1/6}}$ en turbulent où $\mathcal{R}_l = \frac{V_0 l}{\nu}$, avec l longueur de la plaque.

La figure I-13 c compare les courbes C_F en fonction du nombre de Reynolds : une couche limite turbulente donne des forces de frottement plus grandes qu'une couche limite laminaire, mais la validité de la courbe laminaire se trouve limitée dans les applications par la valeur du nombre de Reynolds de transition.

Dans le cas du fluide compressible, un facteur correctif doit être apporté à l'expression obtenue en incompressible pour le coefficient local (à égalité de nombre de Reynolds) ; il dépend du nombre de Mach, du rapport T_p/T_f, mais aussi de T_e. Dans les applications aéronautiques courantes ($M \leqslant 2$), ce facteur est peu différent de 1.

La température de frottement T_f joue un rôle important : si elle est trop élevée du point de vue de la structure, il faut refroidir la paroi pour un vol en régime permanent. Cette température s'obtient par la relation :

$$T_f = T_e + r\frac{V_e^2}{2c_p} = T_e\left(1 + r\frac{\gamma - 1}{2}M_e^2\right)$$

où r est le facteur thermique pariétal, accessible par le calcul ou l'expérience.

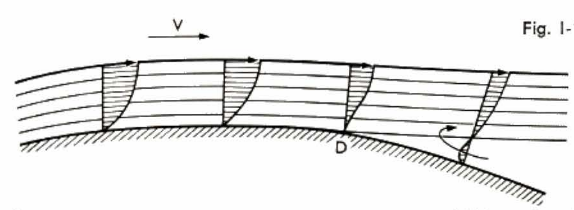
En laminaire $r = 0,85$, en turbulent $r = 0,90$.

Ainsi pour un avion volant à l'altitude de 18 000 m, $T_e = 216,5$ K, $\gamma = 1,4$, on obtient en turbulent (paroi athermane) :

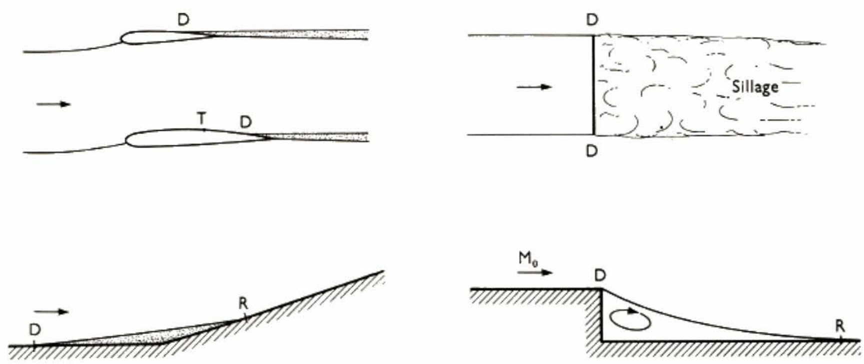
à $M = 2 \rightarrow T_f = 100$ °C ; à $M = 3 \rightarrow T_f = 294$ °C

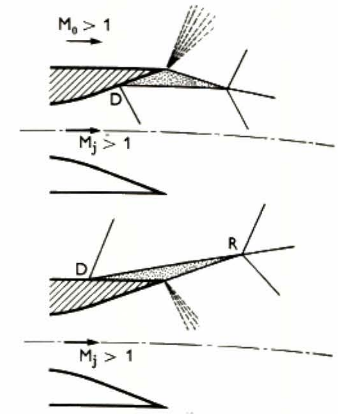
2.8.3. Décollement - Recollement de la couche limite. — La théorie de la couche limite laminaire montre que le profil des vitesses se modifie sous l'effet d'un gradient longitudinal de pression positif ; la pente à l'origine $\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_{y=0}$ peut devenir nulle, caractérisant le *point de décollement*. Il en est de même pour une couche limite turbulente. La figure I-14 montre l'évolution progressive du profil des vitesses d'amont en aval : lorsque la vitesse s'annule dans les couches inférieures, le fluide sous l'effet de la pression plus grande en aval qu'en amont prend une vitesse de sens opposé à celui de la vitesse de l'écoulement extérieur, créant un courant de retour. L'expérience met en évidence le phénomène très important dit *décollement libre* dont la position peut être prévue lorsqu'on étudie le développement d'une couche limite et en particulier l'évolution du

Fig. I-14



Écoulement avec gradient longitudinal de pression positif. D est le point de décollement de la couche limite. Un courant de retour (de l'aval vers l'amont) s'établit entre le fluide décollé et la paroi





a) Décollement libre en D : $M_0 < 1$
T : point de transition
R : point de recollement libre

b) Décollement fixé en D : $M_0 < 1$
R : point de recollement libre

c) Confluence de deux écoulements supersoniques
en haut : jet sur-détendu (tuyère non adaptée d'un avion) ;
en bas : jet sous-détendu (éclatement de jet, missile en altitude)

Fig. I-15

Exemples de décollements et de recollements

coefficient local de frottement puisque celui-ci s'annule au point de décollement.

Pour les applications, il est très important de noter qu'une couche limite turbulente décolle moins facilement qu'une couche limite laminaire, étant donné l'échange intense d'énergie à l'échelle macroscopique qui existe entre les couches inférieures dans une couche limite turbulente : la figure I-15 a illustre cette propriété ; différents cas sont possibles : la couche limite turbulente peut décoller plus en aval, ou ne pas décoller. De tels phénomènes causent des difficultés d'interprétation des résultats d'essais effectués en soufflerie sur des maquettes d'échelles différentes et que l'on veut extrapoler à l'avion réel : les points de décollement peuvent ne pas occuper des positions homologues, de même que les points de transition. Dans certains cas, il est recommandé, sur maquette, de forcer la transition de la couche limite en créant une perturbation au point homologue du point de transition présumé sur avion (*transition déclenchée* par opposition à *transition naturelle*).

Comme la paroi convexe d'une aile, une paroi concave donne lieu à un décollement libre (V. fig. I-15 a).

Les décollements libres, liés au comportement de la couche limite, dépendent du nombre de Reynolds.

Il existe des configurations pour lesquelles le point de décollement est fixé (fig. I-15 b) : arête dont le contournement est impossible, décrochement de la paroi, culot d'un obstacle, etc.

Une couche limite qui décolle peut, dans certaines conditions, recoller : il existe un *point de recollement R* sur la paroi concave et également en aval du décrochement de la paroi : ces points de recollement sont libres et dépendent du phénomène de mélange entre la couche limite et le fluide décollé (animé de faibles vitesses organisées). Des cas plus complexes encore sont obtenus lorsque deux écoulements différents entrent en confluence, par exemple, tuyère propulsive à jet supersonique débouchant dans un écoulement extérieur (fig. I-15 c). En écoulement supersonique, selon le niveau de pression du jet par rapport à celui de l'écoulement extérieur, le décollement peut se produire dans la tuyère avant la sortie du jet sous l'effet des ondes de choc, ou, au contraire, sur le corps, avant le culot. Ces phénomènes peuvent être prévus par un calcul utilisant des critères de recollement.

Dans la zone fluide décollée, la pression est pratiquement constante, modifiant ainsi la répartition théorique déterminée en fluide non visqueux. On en verra les conséquences au paragraphe 3.2.

2.8.4. Phénomène d'interaction entre couche limite et onde de choc. — Une onde de choc se produisant au voisinage d'une paroi, dans un écoulement supersonique, provoque un saut positif discontinu de pression dans l'écoulement extérieur et dans la partie supersonique de la couche limite. Par continuité un gradient continu et positif de pression s'établit dans la partie inférieure subsonique de la couche limite causant un épaississement de celle-ci avec un faisceau d'ondes de compression et, si le saut de pression est suffisamment intense, le décollement. La figure I-16 met en évidence cet effet et sa répercussion sur la répartition des pressions pariétales dans le cas d'un dièdre. Le détail de l'évolution de la pression entre les valeurs théoriques p_0 et p_1 est différent en couche limite laminaire et en couche limite turbulente (V. fig. I-16 b et I-16 c).

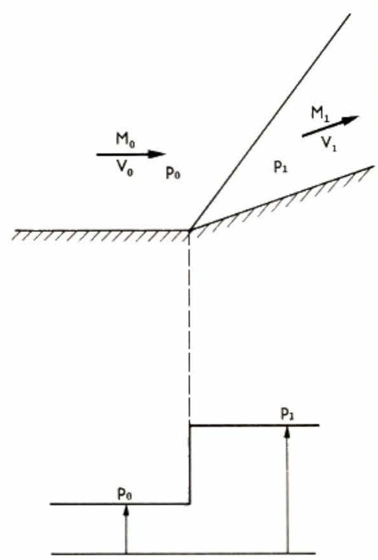


Fig. I-16 a

Théorie (sans couche limite) $M_0 = 2$, déviation 20°

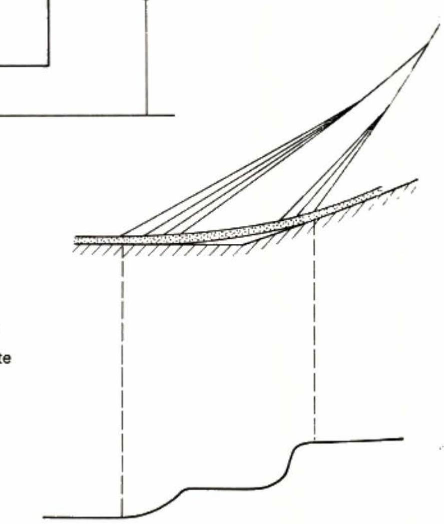


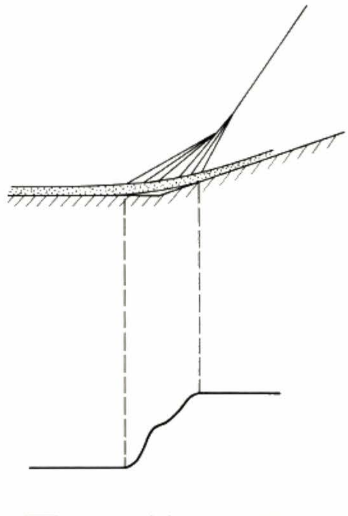
Fig. I-16 b

Couche limite laminaire

Fig. I-16 — Interaction couche limite-onde de choc. Schémas d'écoulements autour d'un dièdre et évolution de la pression le long de la paroi

Fig. I-16 c

Couche limite turbulente



Ces phénomènes d'interaction onde de choc et couche limite ont une très grande importance dans l'aérodynamique des profils d'aile en transsonique et en supersonique. Un autre exemple de ces interactions est donné dans la figure I-15 c où le décollement est provoqué par le gradient de pression dû au choc.

2.9. Réduction des forces élémentaires. Coefficients de forces et de moments. Polaire

2.9.1. Trièdres. — On utilise essentiellement en aérodynamique et en mécanique du vol deux trièdres qui ont pour origine le centre de gravité de l'avion.

Le trièdre avion est défini comme suit : x axe longitudinal, y axe transversal, z axe normal, dans le plan de symétrie, complétant le trièdre direct.

Le trièdre aérodynamique : x_a axe portant le vecteur vitesse $\vec{V}$ de l'avion, z_a axe dans le plan de symétrie, y_a axe qui complète le trièdre direct.

La position des deux trièdres est repérée par l'angle d'incidence α et l'angle de dérapage β (V. planches hors-texte) d'après la norme AFNOR X 02-115-Août 1970. L'incidence α est positive quand l'avion est « cabré », le dérapage β est positif quand l'aile droite est « avancée ».

2.9.2. Coefficients sans dimension de forces et de moments. — La réduction des forces élémentaires sur un avion conduit à une force et à un moment soit à six composantes dans chacun des trièdres. Dans le cas d'un avion sans force de propulsion « planeur », on définit les coefficients de force *sans dimension* suivants dans le trièdre aérodynamique :

- coefficient de traînée $C_x = \dfrac{\text{traînée}}{\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S}$ (traînée $= -X_a$)
- coefficient de force latérale $C_y = \dfrac{\text{force latérale}}{\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S}$

  (force latérale $= Y_a$)
- coefficient de portance $C_z = \dfrac{\text{portance}}{\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S}$

  (portance $= -Z_a$)

De même, dans le trièdre avion pour les coefficients de moment :

Exemple : coefficient de moment de tangage

$$C_m = \frac{\text{moment de tangage}}{\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2 S l}$$

Deux autres définitions analogues permettent de définir les coefficients C_l (roulis) et C_n (giration).

Dans ces définitions, S est une surface de référence (surface de l'aile) et l une longueur de référence (corde de l'aile) à bien préciser.

Il est fondamental de remarquer que les équations de définition des coefficients ci-dessus ne permettent pas de dire que les forces et les moments sont proportionnels au carré de la vitesse ; en effet, ces coefficients varient en fonction des paramètres de similitude : nombre de Reynolds et nombre de Mach qui dépendent de la vitesse (V. § 2.5).

Dans le cas du vol symétrique, l'angle de dérapage est nul, les axes y et y_a sont confondus (fig. I-17 a). Les coefficients C_y, C_l et C_n sont nuls. Dans le trièdre aérodynamique,

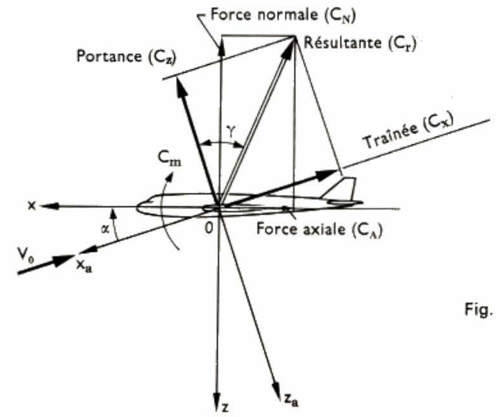


Fig. I-17 a

es six composantes se réduisent à trois : C_x, C_z, C_m. Dans le trièdre avion elles se réduisent aux trois coefficients suivants : C_A, C_N, C_m, avec :

$$C_A = C_x \cos\alpha - C_z \sin\alpha \text{ (force axiale)}$$
$$C_N = C_x \sin\alpha + C_z \cos\alpha \text{ (force normale)}$$

On définit de plus un coefficient de pression K_p en un point où la pression est p par : $K_p = \dfrac{p - p_0}{\frac{1}{2}\rho_0 V_0^2}$.

2.9.3. Représentation des résultats. — Ce qui suit est, dans son principe, applicable à une aile ou à un avion.

La figure I-17 b montre l'allure de C_x et de C_z en fonction de α ; C_x est minimal pour α voisin de zéro ; C_z croît linéairement avec α (α_0 est l'incidence de « portance nulle »), puis passe par une valeur maximale C_z max.

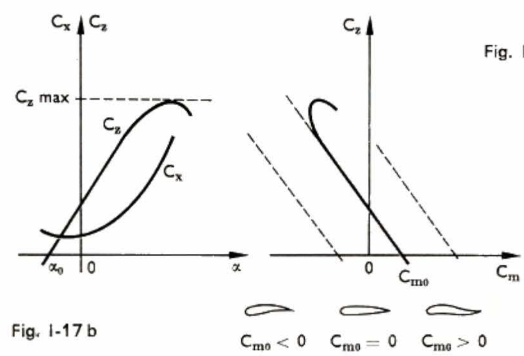


Fig. I-17 b

Fig. I-17 c

L'évolution de C_m en fonction de C_z est particulièrement importante pour les problèmes de stabilité et de manœuvre. Avec un écoulement sain et aux incidences modérées, cette évolution est linéaire (fig. I-17 c). Nous pouvons donc écrire :

$$C_m = C_{m0} + k\, C_z$$

C_{m0} (C_m zéro) est le coefficient de moment pour $C_z = 0$; il dépend en grandeur et en signe de la forme du profil (V. fig. I-17 c) ; k dépend peu du profil, mais de la position du point O, c'est-à-dire de l'axe de tangage par rapport auquel les moments sont mesurés.

La linéarité de C_m (C_z), permet d'introduire la notion de *foyer :* c'est le point par rapport auquel le moment de tangage est constant (ou nul) quel que soit C_z. Considérons un axe de tangage F sur l'axe Ox d'abscisse x_F par rapport à O : $C_{mF} = C_{m0} + \left(k + \dfrac{x_F}{l}\right) C_z$, en confondant C_z et C_N,

ce qui est raisonnable aux incidences modérées. Pour annuler le terme en C_z, il faut que $\frac{x_F}{l} = -k$.

Pour un corps symétrique $C_{m0} = 0$, $C_{mF} = 0$: *le foyer est confondu avec le centre de poussée.*

Dans le cas contraire, la formule $\frac{x_{CP}}{l} = -\frac{C_m}{C_z}$ permet de calculer l'abscisse x_{CP} du centre de poussée à chaque incidence.

La polaire d'une aile ou d'un avion (fig. I-17 d) est la courbe $C_z = f\ (C_x)$; elle présente une allure parabolique qui sera précisée dans la théorie des ailes. Lorsque les échelles des abscisses et des ordonnées sont égales, le rayon vecteur $OM = \sqrt{C_x^2 + C_z^2}$ est égal (à l'échelle près) au coefficient C_r de la force résultante $\vec{R}$.

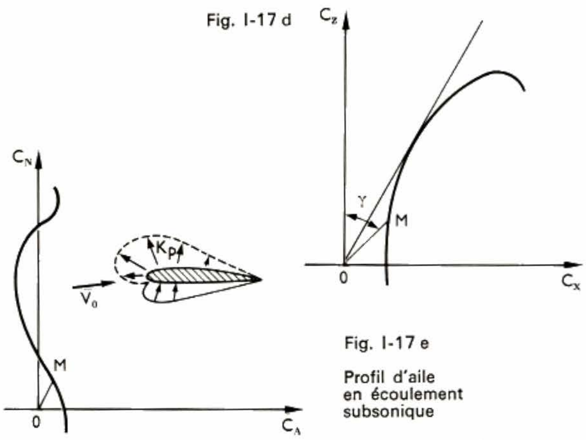


Fig. I-17 d

Fig. I-17 e

Profil d'aile en écoulement subsonique

L'angle γ de OM avec l'axe des ordonnées C_z est alors égal à l'inclinaison de $\vec{R}$ sur la normale à la vitesse V_0 : $\text{tg}\ \gamma = \frac{C_x}{C_z}$. Cet angle passe par une valeur minimale pour une incidence particulière dite de finesse maximale, la *finesse* étant par définition : $f = \frac{C_z}{C_x}$.

L'échelle usuellement utilisée est dix à vingt fois plus grande pour C_x que pour C_z ; la tangente menée de l'origine à la polaire définit encore la finesse maximale, mais l'angle γ n'apparaît plus directement.

On utilise aussi assez fréquemment la polaire $C_N = f(C_A)$ qui, tracée avec des échelles égales, met en évidence l'inclinaison de la résultante par rapport à la normale à l'axe Ox.

Dans le cas d'un profil d'aile, avec Ox confondu avec la plus grande corde du profil, et en écoulement subsonique, la résultante peut être en avant de la normale au plan de la corde (fig. I-17 e) dénotant une *force de succion* due aux dépressions de bord d'attaque.

3. AÉRODYNAMIQUE DES PROFILS D'AILES

3.1. Introduction de la notion de profil d'aile. — La section d'une aile d'avion par un plan parallèle au plan de symétrie de l'avion est appelée *profil d'aile*. L'étude aérodynamique d'une aile doit être précédée de celle de l'écoulement bidimensionnel autour du profil.

D'une manière concrète, on peut imaginer une aile cylindrique d'envergure infinie ayant pour section droite celle du profil dans un écoulement dont la vitesse à l'infini est perpendiculaire au bord d'attaque.

La théorie du profil d'aile est faite dans les différents domaines du nombre de Mach, en écoulement permanent et irrotationnel de fluide parfait. Elle trouve son application dans le calcul des ailes d'avions, mais aussi des hélices ; les grilles d'aubes des compresseurs dérivent des profils d'ailes avec une loi de périodicité imposée par les conditions aux limites. Sur les pales d'hélicoptères, la connaissance de l'aérodynamique du profil d'aile est indispensable mais il faut étudier, de plus, les effets des variations cycliques d'incidence et de vitesse (phénomènes instationnaires).

3.2. Basses vitesses. - Modèle du fluide incompressible. — L'écoulement est uniforme à l'infini amont, et irrotationnel ; les composantes u et v de la vitesse locale V en un point quelconque x, y de l'écoulement, sont les dérivées partielles d'une fonction $\varphi\ (x, y)$, appelée *potentiel des vitesses* (V. t. 3, Mécanique des fluides) :

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x},\quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}$$

L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x}\ (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}\ (\rho v) = 0$$

soit ici :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

Le potentiel des vitesses satisfait à une équation de Laplace :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0$$

Étant donné un profil il s'agit de déterminer le potentiel des vitesses satisfaisant aux conditions aux limites : l'écoulement est uniforme à l'infini, le profil est une ligne de courant (vitesse tangente en chaque point du profil).

La connaissance du potentiel des vitesses permet d'obtenir la vitesse locale V en tout point et la pression p liées aux conditions à l'infini V_0, p_0 par l'intégrale de Bernoulli (V. § 2.6) :

$$p + \frac{\rho_0 V^2}{2} = p_0 + \frac{\rho_0 V_0^2}{2}$$

Parmi les méthodes mathématiques permettant de déterminer le potentiel des vitesses autour d'un profil, une des plus simples consiste à déduire l'écoulement autour du profil de l'écoulement autour d'un cercle. On sait en effet calculer exactement ce dernier écoulement en superposant deux potentiels des vitesses. Le premier donne un écoulement symétrique (fig. I-18 a) ; le second donne des lignes de courant circulaires centrées sur le cercle de rayon a ; il correspond à un *tourbillon* d'intensité Γ (fig. I-18 b). *La circulation des vitesses* $\int_C \vec{V}.\vec{ds}$ est constante et égale à Γ, quel que soit le contour C fermé autour du cercle. La figure I-18 c donne les lignes de courant de l'écoulement dû

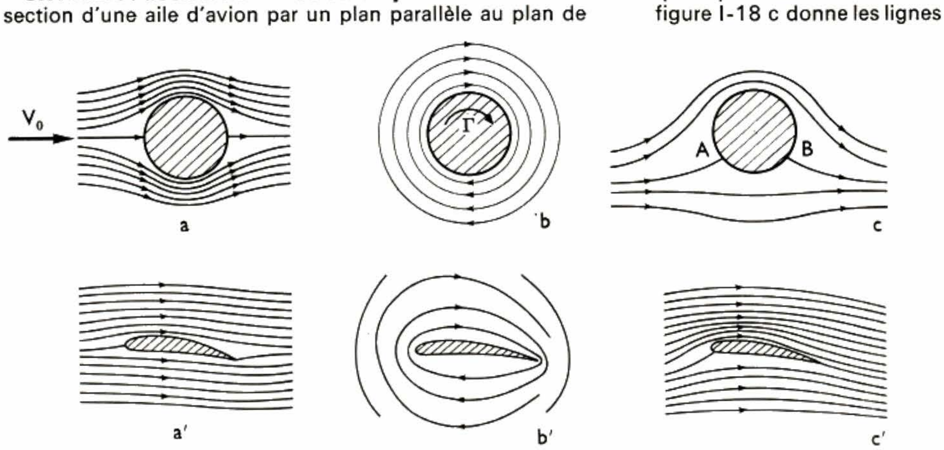
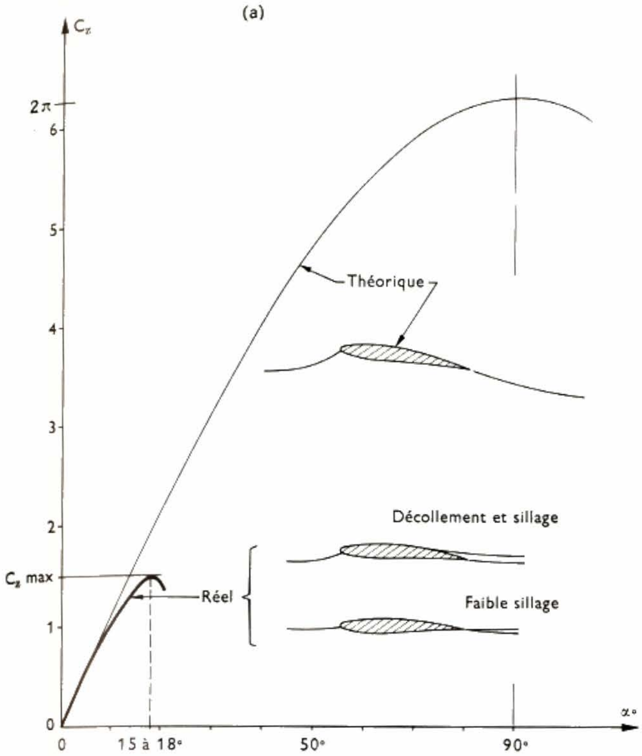


Fig. I-18



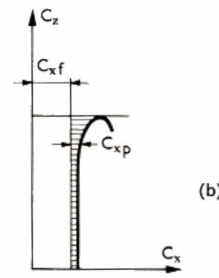


Fig. I-19

a) Portances théorique et réelle d'un profil d'aile
b) Polaire réelle

à la superposition des deux potentiels : on obtient ainsi sur le cercle deux points A et B de vitesse nulle si $\Gamma < 4\pi a V_0$.

La transformation analytique utilisée (transformation conforme) pour passer du cercle au profil conserve la circulation et permet d'obtenir les lignes de courant autour du profil pour chacun des potentiels (fig. I-18 a', et I-18 b') et finalement pour les deux potentiels. On s'impose que le point de vitesse nulle B sur le cercle corresponde toujours au bord de fuite du profil quelle que soit la circulation : cette condition connue sous le nom de *condition de Joukovski* assure le départ au bord de fuite de la ligne de courant aval (fig. I-18 c').

Le *théorème de Kutta-Joukovski* permet d'énoncer le résultat fondamental suivant : la résultante des forces élémentaires (de pressions) sur le profil est une force normale à la vitesse à l'infini $\overrightarrow{V_0}$ amont, son sens est obtenu en faisant tourner $\overrightarrow{V_0}$ de 90° dans le sens opposé à celui de la circulation, son module est $\rho_0 V_0 \Gamma\, dy$ sur une tranche de profil de largeur dy. Le coefficient C_z de cette résultante (V. § 2.9) est : $C_z = \dfrac{\rho_0\, V_0\, \Gamma\, dy}{\frac{1}{2}\rho_0\, V_0^2\, l\, dy}$ (où $l\, dy$ est la surface de référence, l étant la corde du profil).

La condition de Joukovski introduit la relation $\Gamma = 4\pi\, a\, V_0 \sin\alpha$, où α est l'angle d'incidence du profil compté à partir de l'incidence de portance nulle.

Par suite : $C_z = 2\,k \sin\alpha$

k est un coefficient voisin de π qui dépend légèrement de la forme du profil (fig. I-19a).

D'après cette théorie, le coefficient C_z est maximal et voisin de 2π pour $\alpha = 90°$. Aux petites incidences, il vient :

$$C_z = 2\,k\,\alpha$$

De plus, puisque la résultante est normale à V_0, la traînée est nulle, c'est le *paradoxe de d'Alembert*.

Le coefficient de pression K_p (V. § 2.9) s'écrit :

$$K_p = 1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2$$

Au point de vitesse nulle $K_p = 1$.

Les résultats expérimentaux obtenus en fluide visqueux aux nombres de Reynolds $\mathcal{R}_l = V_0 l/\nu$ supérieurs à 300 000 (ce qui exclut les très faibles vitesses ou les fluides très visqueux ; pour l'air $\mathcal{R}_l = 300\,000$ correspond, par exemple, à $V_0 = 50$ m/s avec $l = 0{,}08$ m puisque $\nu = 14{,}6 \cdot 10^{-6}$ m²/s pour les conditions 15 °C, 760 mm de mercure) vérifient bien la loi linéaire avec un gradient de portance $dC_z/d\alpha$, légèrement plus faible que le gradient théorique, qui dépend un peu du nombre de Reynolds, mais est rarement inférieur à 0,10 (valeur 0,11 à 0,10). Le léger déficit de portance est dû à l'existence des couches limites d'intrados et d'extrados dont la rencontre au bord de fuite donne naissance à un *sillage* qui transforme le profil fermé en un profil ouvert. Quand l'incidence croît au-delà de 10° (à titre indicatif), la courbe C_z (α) peut légèrement s'écarter de la loi linéaire dénotant une croissance moins rapide de la portance due au comportement de la couche limite : sous l'effet du gradient de pression $\partial p/\partial s$ qui règne sur le profil en aval du point de vitesse maximale, la couche limite décolle un peu en amont du bord de fuite (V. § 2.8). Ce décollement avance sur le profil quand l'incidence croît encore et finalement la courbe C_z (α) prend une valeur maximale voisine de 1,2 à 1,5 pour une incidence proche de 15 à 18° (V. fig. I-19 a).

Les pressions sur le profil sont légèrement modifiées au voisinage du bord de fuite par suite du sillage : l'intégrale des forces de pression projetées sur la vitesse à l'infini n'est plus strictement nulle ; il existe une *traînée de pression :* (coefficient C_{xp}).

Lorsqu'un décollement apparaît sur le profil, les pressions théoriques sont modifiées (la pression est sensiblement constante dans la zone décollée) ; la traînée de pression croît d'autant plus que le décollement intéresse une plus grande partie du profil. Ainsi la traînée de pression C_{xp} croît quand l'incidence augmente.

De plus, et cela à toutes les incidences, la couche limite crée des forces élémentaires de frottement (V. § 2.8), qui, projetées sur la direction de la vitesse à l'infini, engendrent une traînée de frottement (coefficient C_{xf}). Pour une plaque plane, la traînée de frottement est égale à deux fois le coefficient de frottement moyen (deux faces).

Nous pouvons résumer comme suit la situation :

viscosité ⇒ couche limite
- effet direct → traînée de frottement C_{xf}
- effet indirect → sillage et décollements ; traînée de pression C_{xp}

Le décollement dépend de la nature de la couche limite, laminaire ou turbulente et, de plus, du nombre de Reynolds dans une certaine mesure ; il peut être prévu par un calcul de couche limite, mais seule l'expérience permet de déterminer la valeur maximale de C_z.

La figure I-19 b montre l'allure de la polaire d'un *profil d'aile :* elle dénote une faible croissance de C_x tant que les décollements ne sont pas importants.

Le moment de tangage par rapport au bord d'attaque A (coefficient C_{mA}) est de la forme $C_{mA} = C_{m0} + k\, C_z$ avec $k \approx -0{,}25$ (cela correspond à un foyer situé à 25 % environ de la corde en arrière du bord d'attaque, quel que soit le profil). Le coefficient C_{m0} dépend en grandeur et en signe de la forme du squelette : si le profil comporte un volet, le braquage de celui-ci permet de faire varier C_{m0}.

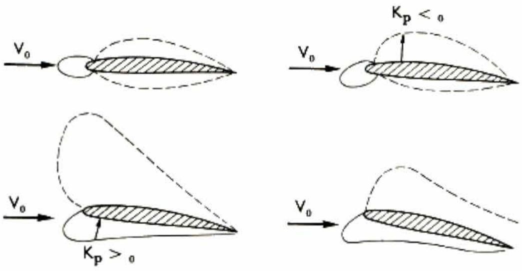


Fig. I-20 — Répartitions de pression sur un profil en écoulement subsonique (incidence croissante)
—— surpressions $K_p > 0$
------ dépressions $K_p < 0$

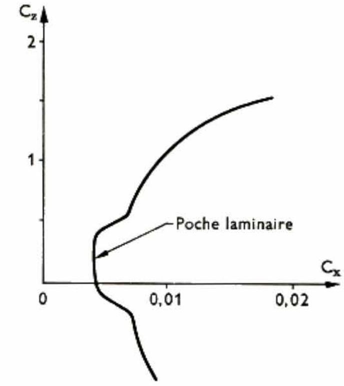


Fig. I-21

Fig. I-21 — Profil laminaire (résultat type, profil ayant un excellent état de surface). La géométrie du profil permet de faire varier la position de la poche laminaire et son étendue. Une rugosité croissante de la paroi du profil fait disparaître progressivement la poche laminaire

La répartition des pressions sur un profil d'aile (fig. I-20) met en évidence des régions de surpressions ($K_p > 0$) ou de dépressions ($K_p < 0$) par rapport à la pression p_0 qui règne à l'infini; leur évolution est très instructive, faisant comprendre le mécanisme de la sustentation et l'apparition du décollement. De plus, elle permet de préciser la contribution de l'intrados et celle de l'extrados: les dépressions d'extrados assurent les 2/3 ou les 3/4 de la portance. En outre, les fortes dépressions au contournement du bord d'attaque créent une *force de succion* qui peut conduire à une résultante inclinée *en avant* de la normale au profil (V. fig. I-17 e).

Du point de vue théorique, une circulation ne peut s'établir autour du profil à partir du fluide parfait au repos. C'est la viscosité du fluide qui provoque l'échappement d'un tourbillon-Γ corrélatif à l'établissement d'une circulation Γ.

3.2.1. Famille de profils. — Des constructions graphiques permettent de tracer des familles de profils en explicitant la fonction de transformation (profils Joukovski, Karman-Trefftz, Toussaint). Plus généralement, on peut calculer l'écoulement à partir de la géométrie du profil, (profils N.A.C.A.). Des méthodes inverses permettent de déterminer un profil répondant à une répartition de pression donnée: les *profils laminaires* du N.A.C.A. sont obtenus ainsi en s'imposant, à une incidence dite d'adaptation, une répartition favorable au maintien d'une couche limite laminaire étendue. De tels profils présentent effectivement une traînée de frottement minimale sur une plage d'incidence autour de l'incidence d'adaptation et des polaires de forme caractéristique (poche laminaire, fig. I-21).

Nous retiendrons, à titre indicatif, les ordres de grandeur suivants:

- épaisseur relative des profils utilisés en subsonique modéré: 8 à 12 ou 15 %
- $dC_z/d\alpha$ = 0,10 à 0,11 (avec α en degrés)
- C_z max: 1 à 1,5; α correspondant: 15 à 18°
- C_x min: environ 0,010 à 0,007 (selon le profil et le nombre de Reynolds)
- C_{mo} usuellement compris entre − 0,01 et + 0,01 (sans volet). Lorsque C_x est minimal le frottement représente la plus grande partie de la traînée.

Du point de vue des applications, les profils laminaires sont très sensibles aux imperfections de fabrication et à la rugosité de surface: ils exigent des usinages précis et, en service, le maintien d'un poli de surface. Ils sont utilisés non seulement aux faibles vitesses, mais en subsonique élevé.

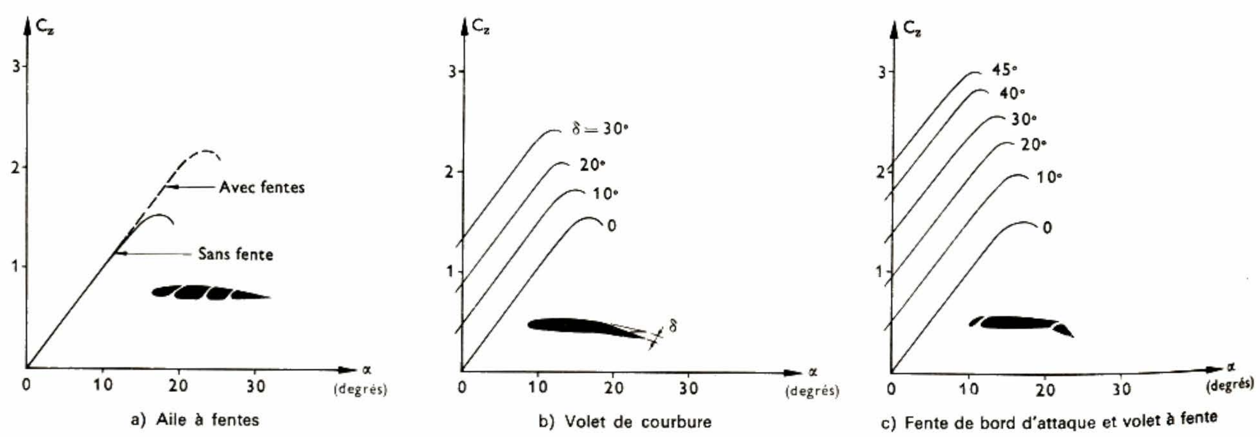
Certains profils présentent une grande dépression sur l'extrados au voisinage immédiat du bord d'attaque (profils *peaky*); celle-ci, suivie d'une recompression, peut engendrer un décollement laminaire avec recollement laminaire ou turbulent limitant une petite « bulle » de fluide décollé qui intéresse seulement quelques pour cent de la corde: son étendue, « bulle » *longue* ou *courte*, conditionne le mode plus ou moins brutal de *décrochement* du profil, courbe C_z (α) au voisinage de C_z max.

3.2.2. Hypersustentation. — L'équation de sustentation d'un avion en vol horizontal uniforme s'écrit:

$$\text{poids} = \frac{1}{2} \rho_0 V_0^2 S C_z$$

La vitesse minimale de vol est donc liée à la valeur maximale du coefficient C_z (C_z max). Comme l'aile est l'élément sustentateur essentiel d'un avion, le coefficient C_z max d'une aile (et celui des profils qui la constituent) prennent une grande importance. Il convient donc de mettre en œuvre divers procédés pour augmenter C_z max.

L'aile à fentes comporte des canaux convergents entre l'intrados et l'extrados; sous l'effet des différences de pression, un écoulement naturel s'établit qui retarde le décollement de la couche limite: la courbe théorique C_z (α) est donc prolongée (fig. I-22 a), ce qui accroît C_z max. Ce procédé n'est pas utilisé en raison de l'augmentation de C_x, même aux faibles valeurs de C_z, et de la complexité des problèmes de structure.



a) Aile à fentes — b) Volet de courbure — c) Fente de bord d'attaque et volet à fente

Fig. I-22 — Hypersustentation d'un profil d'aile (diagrammes types à faible nombre de Mach, M ≈ 0,2)

Le braquage d'un volet occupant 20 à 30 % de la corde de l'aile conduit à des courbes C_z (α) sensiblement parallèles ; à incidence constante on peut donc accroître C_z. On obtient des valeurs de C_z max plus élevées également (fig. I-22 b) ; elles sont limitées par le décollement sur le volet.

Pour y remédier, on utilise des volets à fente grâce à un axe d'articulation convenablement placé ou à une cinématique assurant une translation en même temps que la rotation. Le volet peut être simple ou double.

Les très grandes portances sont limitées par un décollement qui se produit sur l'aile en arrière du bord d'attaque ; un volet à fente de bord d'attaque permet de l'éviter (fig. I-22 c). On peut avec de tels moyens atteindre des valeurs de C_z max voisines de 3.

Un procédé plus énergique consiste à utiliser un *soufflage forcé* sur le volet de bord de fuite pour empêcher le décollement sur le volet et lui restituer ainsi ses propriétés théoriques que des mesures à la cuve électrique permettent de déterminer. Ce soufflage forcé est possible sur les avions à réaction, en prélevant une partie du débit d'air à la sortie du compresseur au moment de l'atterrissage (V. § 5.5) : on peut obtenir ainsi des valeurs de C_z max de 4 à 5 (sur profil).

Du point de vue des applications à l'avion, les volets hypersustentateurs ne peuvent occuper toute l'envergure de l'aile, ce qui réduit les valeurs de C_z max accessibles soit uniquement par braquage des volets, soit aussi en conjuguant braquage et soufflage. Il faut aussi que les hypersustentateurs n'engendrent pas des moments de tangage inacceptables.

À propos du braquage d'un volet, précisons que les ailerons produisent d'une manière antisymétrique des variations locales de portance par des braquages de signes contraires (couple de roulis recherché auquel est lié un couple de giration secondaire).

3.3. Écoulement subsonique compressible. — L'équation au potentiel des vitesses, en supposant que les perturbations de vitesse dues à la présence du profil sont petites devant la vitesse à l'infini, peut être mise sous la forme linéarisée : $(1 - M_0^2)\dfrac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0$

qui pour M_0^2 négligeable devant 1 se réduit à l'équation de Laplace (V. § 3.2).

Une transformation analytique, connue sous le nom d'*approximation de Prandtl-Glauert*, conduit au résultat suivant : en un point du profil, pour le nombre de Mach M_0 à l'infini, le coefficient de pression est :

$$K_{p\,(M_0)} = \frac{K_{p\,(M=0)}}{\sqrt{1 - M_0^2}}$$

où K_p ($M = 0$) est le coefficient de pression au même point en incompressible et à la même incidence.

En dehors de la couche limite, l'écoulement peut être considéré comme isentropique, et par suite, la pression locale p en un point du profil est liée au nombre de Mach local M par la relation (5) du paragraphe 2.6 :

$$\frac{p}{p_i} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

avec : $$\frac{p_0}{p_i} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M_0^2\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$ à l'infini.

La relation ci-dessus entre les coefficients K_p conduit à :

$$C_{z\,(M_0)} = \frac{C_{z\,(M=0)}}{\sqrt{1 - M_0^2}}$$

Le gradient de portance est donc :

$$\left(\frac{dC_z}{d\alpha}\right)_{M_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - M_0^2}}\left(\frac{dC_z}{d\alpha}\right)_{M=0}$$

L'expérience vérifie bien cette évolution théorique du gradient de portance en fonction du nombre de Mach, tant que l'écoulement sur le profil reste entièrement subsonique (on dit encore *subcritique*).

On appelle *nombre de Mach critique* M_c, la valeur du nombre de Mach à l'infini pour laquelle apparaît une vitesse maximale sonique sur le profil, c'est-à-dire un Mach local $M = 1$, à l'incidence considérée (V. fig. I-24 a). Pour un profil donné M_c est fonction de l'incidence.

Si $M_0 > M_c$, l'évolution expérimentale du gradient de portance suit encore la loi théorique jusqu'à une valeur M_{DZ} du nombre de Mach à l'infini (M_{DZ} est appelé Mach de divergence de portance ; fig. I-23 a).

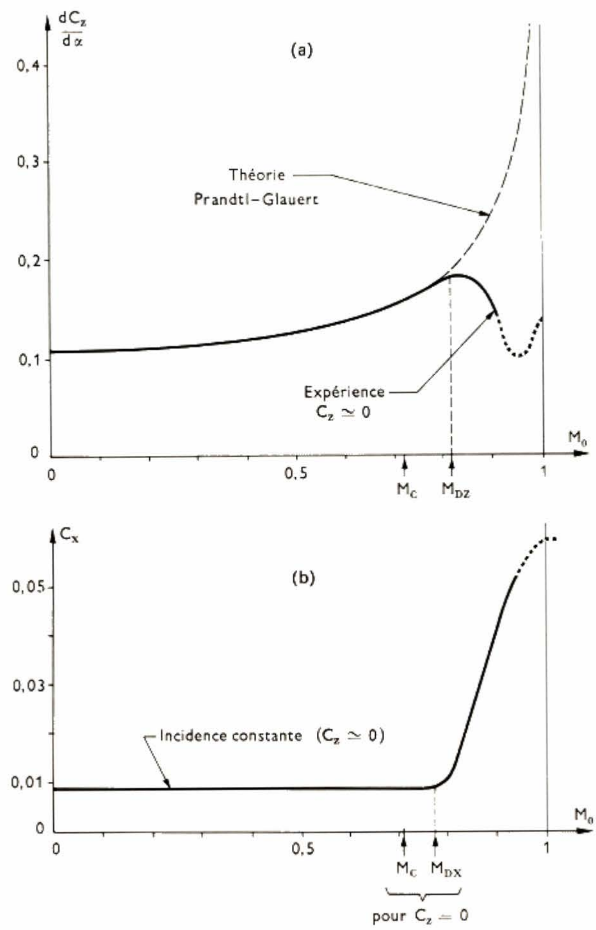


Fig. I-23 — Profil d'aile : effets de compressibilité. Quand l'incidence (et par suite C_z) croît ; M_c, M_{DX} et M_{DZ} diminuent. Pour $M_c < M_0 < 1$, les évolutions des courbes C_z, C_x (et C_m) dépendent beaucoup de la géométrie du profil

Corrélativement (fig. I-23 b), le coefficient de traînée C_x qui avait sensiblement conservé la même valeur qu'en incompressible croît rapidement à partir d'une valeur M_{DX} un peu inférieure à M_{DZ} (M_{DX} est le nombre de Mach de divergence de traînée). Le centre de poussée, sensiblement invariant jusqu'alors, subit des variations importantes.

Ces évolutions de C_z, C_x, C_m traduisent l'effet de compressibilité qui apparaît à des valeurs de M_0 d'autant plus petites que le profil est plus épais et que l'incidence est plus grande. Exemple : $M_c = 0{,}7$ à 0,8 aux faibles incidences, pour des profils relativement peu épais. Du point de vue des applications aux avions subsoniques rapides, toutes ces évolutions sont très défavorables ; la forme en *flèche* de l'aile permet d'en retarder l'apparition (V. § 4.2).

Quand l'incidence est grande, on peut obtenir une zone locale supersonique, pour des Mach à l'infini de 0,3 à 0,5.

3.4. Écoulement transsonique. — Quand $M_0 > M_c$, l'écoulement est caractérisé par une petite zone supersonique à l'extrados du profil, limitée par une *ligne sonique*, lieu des points où $M = 1$ sur les différents filets qui la traversent (fig. I-24 b). L'écoulement est dit mixte et le profil *supercritique*.

Quand M_0 croît encore, cette zone supersonique se déve-

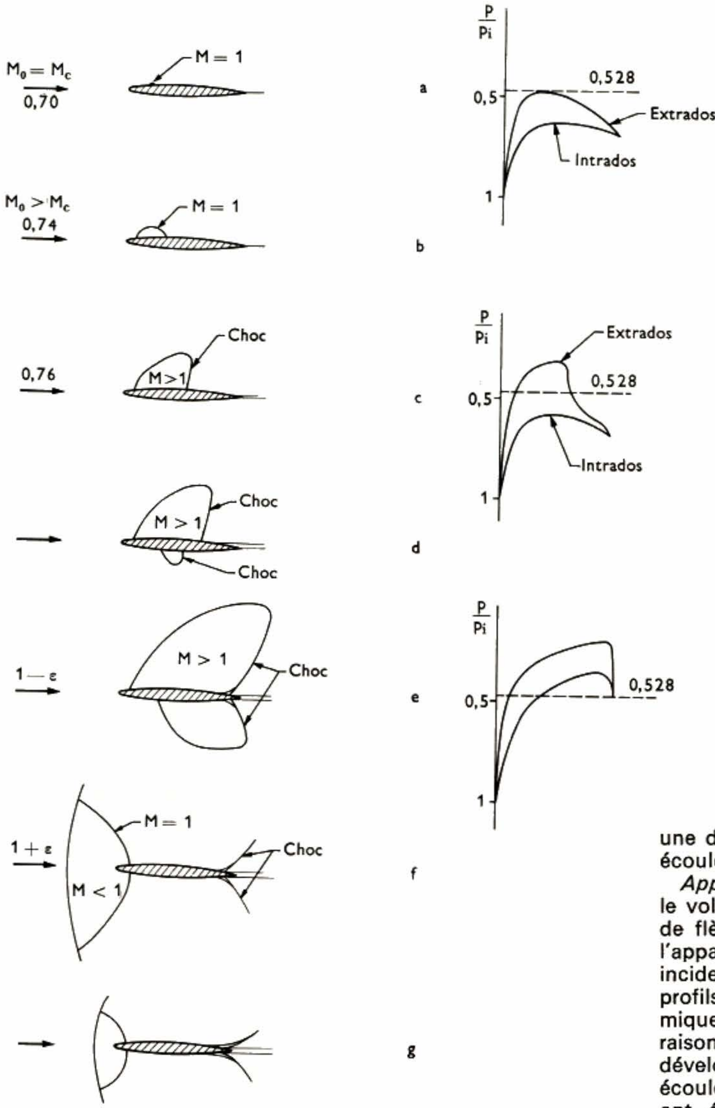


Fig. I-24

Schémas d'écoulements autour d'un profil en transsonique faible incidence (couche limite turbulente) Le nombre de Mach à l'infini M_0 croît de haut en bas

loppe et se trouve limitée par une *onde de choc* (V. § 2.7) sensiblement normale aux filets fluides: cette onde de choc fait passer d'une vitesse locale supersonique amont à une vitesse locale subsonique aval, par une irréversibilité de l'écoulement (fig. I-24 c). L'onde de choc modifie la répartition des pressions et donne naissance à une *traînée de pression*; de plus, la couche limite peut décoller (V. § 2.8) causant une nouvelle augmentation de la traînée de pression.

Les visualisations strioscopiques de l'écoulement montrent cette onde de choc qui apparait à l'extrados sur un profil en incidence, mais également à l'intrados quand le nombre de Mach croît davantage.

Lorsque le nombre de Mach tend vers 1 par valeurs subsoniques, les ondes de choc d'extrados et d'intrados atteignent le bord de fuite: les positions relatives de ces ondes au cours de leur recul provoquent des variations très importantes de C_z (V. fig. I-23 a) et également de C_m. L'écoulement sur la plus grande partie du profil est supersonique. Quand M_0 dépasse 1, un choc détaché (V. § 2.7) se produit à l'avant du profil avec un domaine subsonique limité par une ligne sonique (fig. I-24 f). Quand M_0 croît encore, le choc détaché se rapproche, les chocs au bord de fuite s'inclinent davantage. Généralement, ces chocs donnent lieu à des phénomènes d'interaction avec la couche limite (V. § 2.8).

Les diagrammes de pression évoluent notablement avec M_0. Sur la figure I-24 a, les répartitions à l'extrados et à l'intrados sont du type subsonique, caractérisées par une détente suivie d'une recompression. La figure I-24 e montre une détente continue sur tout le profil; elle conduit à un écoulement supersonique en aval du point sonique.

Applications. — Le domaine $0{,}75 < M_0 < 0{,}90$ intéresse le vol de croisière des avions subsoniques rapides, l'effet de flèche est mis à profit pour retarder ou même éviter l'apparition de phénomènes transsoniques aux faibles incidences de vol (V. § 4.2). Les études transsoniques de profils d'ailes trouvent leur application dans l'aérodynamique des pales d'hélicoptères (V. § 5.11). Pour toutes ces raisons, des études théoriques et expérimentales ont été développées dans les décennies 1950-1970 sur les écoulements transsoniques. De nouvelles formes de profils ont été proposées (profils *peaky* étudiés en Grande-Bretagne ayant une pointe de survitesse au bord d'attaque et, plus récemment, profils à extrados plat, présentant tout au contraire une répartition de vitesses sensiblement constante à l'extrados).

Similitude transsonique. — Signalons que l'équation au potentiel des vitesses donnée au paragraphe 3.3 n'est pas valable si $M_0 = 1$. L'équation à utiliser présente un second membre; elle conduit pour des profils affins à des lois de similitude applicables quand $M_0 = 1$.

3.5. Écoulement supersonique. — Lorsque le nombre de Mach est supersonique, un choc se produit en avant d'un profil à bord d'attaque arrondi; le calcul de l'écoulement subsonique en aval du choc est particulièrement difficile et il n'existe pas d'expressions explicites des pressions locales et des efforts. En revanche, lorsque le profil a un bord d'attaque pointu, une théorie de petites perturbations peut être employée (Ackeret, 1925) et conduit à des expressions très simples, applicables à des profils minces et aux incidences faibles. Cette théorie s'appuie sur les propriétés d'une *déviation élémentaire d'un écoulement supersonique de fluide parfait* (une déviation finie donnerait, rappelons-le, une détente de Prandtl-Meyer (V. § 2.6) ou un choc oblique (V. § 2.7), selon son signe).

La figure I-25 montre les deux cas de déviation élémentaire; les domaines M_0 et M_1 sont uniformes et séparés par une *onde de Mach* de détente ou de compression, faisant l'angle de Mach α_0 avec la vitesse amont: la différence de pression $p_1 - p_0$ s'exprime simplement.

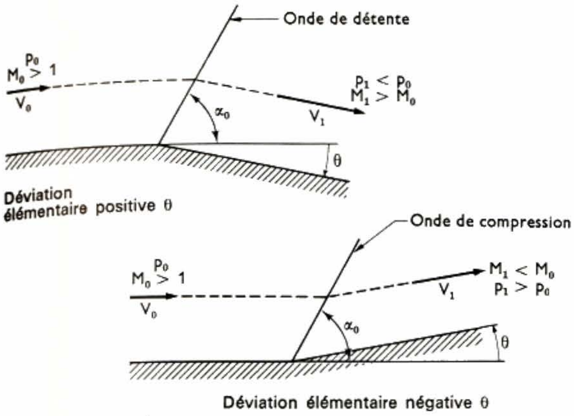


Fig. I-25 — Déviations élémentaires d'un écoulement supersonique

Dans le cas d'un profil plan sans épaisseur et en incidence (fig. I-26 a), il suffit d'appliquer les résultats ci-dessus pour voir que l'extrados de la plaque est en dépression, tandis que l'intrados est en surpression : ainsi la force résultante est normale à la plaque et le centre de poussée se trouve à 50 % de la corde du profil. Le calcul conduit à :

$$C_z = \frac{4}{\sqrt{M_0^2 - 1}}\alpha, \quad C_{xi} = \frac{4}{\sqrt{M_0^2 - 1}}\alpha^2 \text{ (}\alpha\text{ en radians).}$$

Il existe une *traînée de portance* (coefficient C_{xi}) qui s'annule pour $\alpha = 0$ ($C_z = 0$), contrairement au cas subsonique où la traînée de pression reste nulle selon le paradoxe de d'Alembert, même lorsque le profil est portant. De plus, le centre de poussée est situé à 50 % de la corde en supersonique, alors qu'il était à 25 % environ de la corde en subsonique.

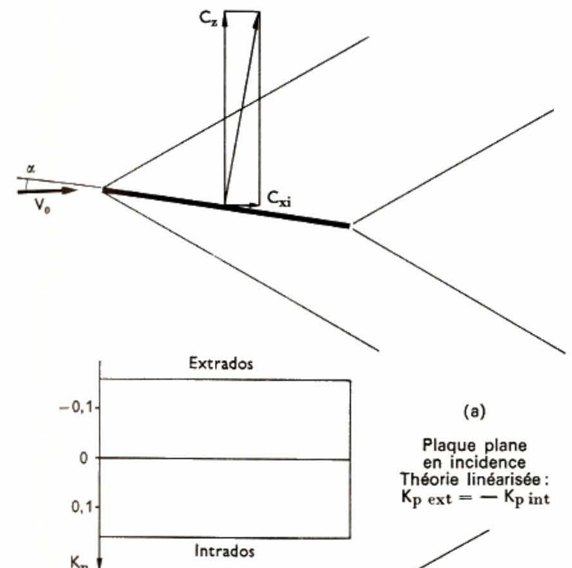
Dans le cas d'un profil ayant une loi d'épaisseur (fig. I-26 b), mais toujours un bord d'attaque pointu, on applique le phénomène de base de la figure I-25, en considérant un contour polygonal à grand nombre de côtés inscrit dans le profil. Des calculs simples linéarisés conduisent à la même formule que ci-dessus pour C_z et à un centre de poussée à 50 % de la corde ; le terme C_{xi} est également donné par la formule ci-dessus mais il faut ajouter un terme supplémentaire C_{x0} dû à l'effet d'épaisseur, appelé *traînée d'ondes*, qui dépend de la loi de distribution de l'épaisseur mais est, dans tous les cas, proportionnel au carré de l'épaisseur relative $\frac{e}{l}$.

La traînée de pression est égale à :

$$C_x = C_{xi} + C_{x0} = \frac{4}{\sqrt{M_0^2 - 1}}\left[\alpha^2 + k\left(\frac{e}{l}\right)^2\right]$$

Le coefficient C_{x0} est la traînée du profil à incidence nulle. La polaire $C_z(C_x)$ est parabolique, son paramètre et l'abscisse C_{x0} dépendent de M_0.

L'expérience vérifie bien les prévisions du calcul pour les faibles épaisseurs et aux incidences modérées ; le calcul peut être amélioré en tenant compte de la *déviation* finie qu'impose le bord d'attaque (calcul choc-détente, fig. I-26 c) ; les résultats globaux restent voisins de ceux du



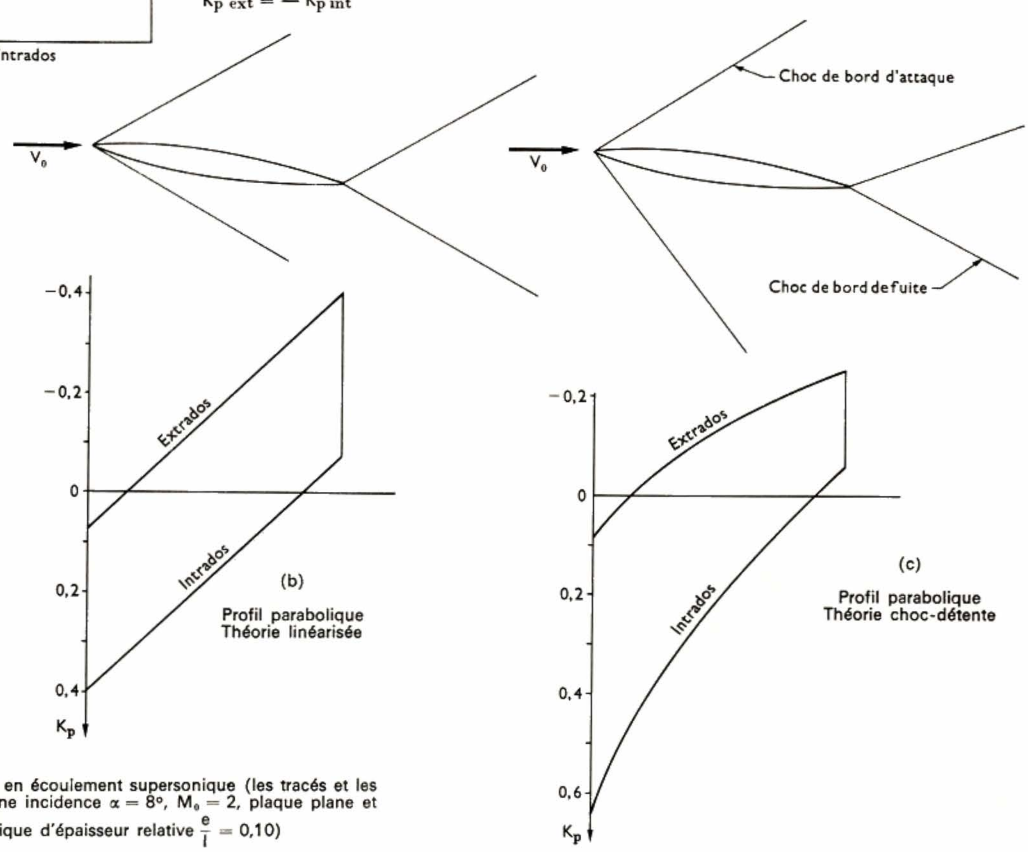


Fig. I-26 — Profils d'aile en écoulement supersonique (les tracés et les courbes sont relatifs à une incidence $\alpha = 8°$, $M_0 = 2$, plaque plane et profil parabolique d'épaisseur relative $\frac{e}{l} = 0{,}10$)

calcul linéarisé. Toutefois, le foyer du profil est situé en avant de 50 % de la corde.

La présence d'une couche limite ne modifie pas sensiblement les phénomènes au bord d'attaque (couche limite naissante), mais très notablement au bord de fuite, surtout avec une couche limite laminaire où l'interaction couche limite-onde de choc (V. § 2.8) produit généralement un décollement à l'extrados qui diminue C_z.

Du point de vue des applications, les missiles sont dotés d'empennages droits ou en flèche, comme c'est le cas le plus fréquent pour les ailes d'avions. L'effet de flèche peut conduire à un écoulement subsonique normal au bord d'attaque (V. § 4.2, fig. I-35) : cela explique l'utilisation de profils minces à bord d'attaque arrondi (bien que M_0 soit plus grand que 1) permettant de bénéficier de l'effet subsonique de succion et plus appropriés au vol à basses vitesses dans les phases de décollage et d'atterrissage.

3.6. Écoulement hypersonique. — Une expression très simple des coefficients de pression dans le domaine hypersonique ($M_0 > 6$, à titre indicatif) est obtenue en appliquant la théorie corpusculaire de Newton selon laquelle les particules qui rencontrent une plaque plane inclinée de l'angle θ perdent leur quantité de mouvement normale mais conservent leur quantité de mouvement tangentielle (fig. I-27). Ainsi, seules les trajectoires des particules entre les filets *A* et *B* sont modifiées après l'impact sur la plaque et

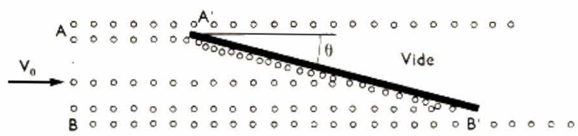


Fig. I-27 — Plaque plane en incidence. Schéma d'écoulement newtonien autour d'une tranche de la plaque

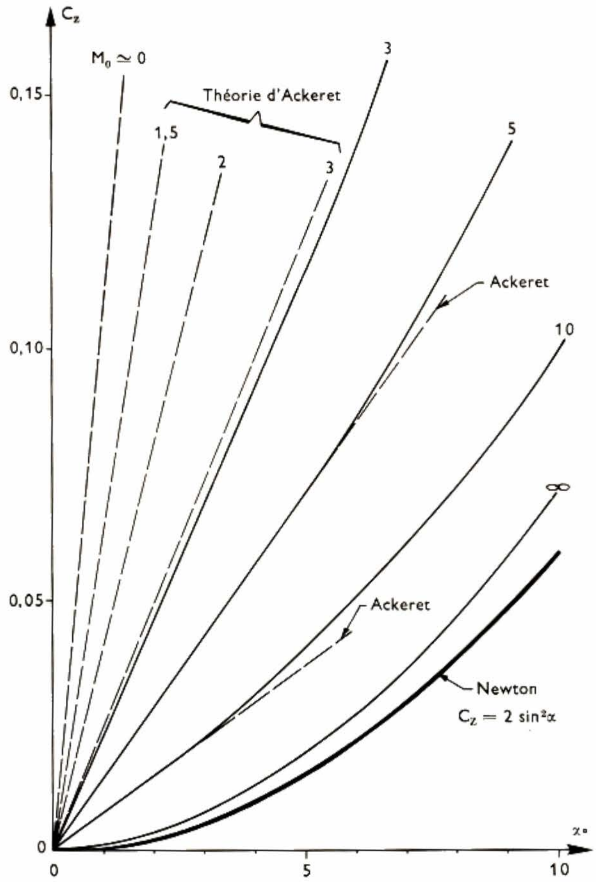


Fig. I-28 — Plaque plane infinie
- - - - Théorie supersonique linéaire (Ackeret)
—— Théorie hypersonique de petites perturbations
—— Théorie newtonienne

s'écoulent parallèlement à celle-ci provoquant une surpression d'intrados tandis que le vide règne à l'extrados. Le calcul donne pour le coefficient de pression : $K_p = 2\sin^2\theta$. Cette formule est applicable à un élément d'un corps dont le plan tangent fait l'angle θ avec $\vec{V_0}$. Pour la plaque plane infinie, il vient : $C_z = 2\sin^2\theta$ et $C_x = 2\sin^3\theta$. Ces résultats sont indépendants du nombre de Mach M_0.

Des théories de petites perturbations prolongent celles établies en supersonique et montrent que pour un gaz donné on peut établir des relations de la forme : $\frac{K_p}{\theta^2} = f(M\theta)$. Elles conduisent à des lois de similitude en hypersonique.

La figure I-28 rassemble, pour une plaque plane en incidence ($\alpha = 0$), la courbe $C_z = f(\alpha)$ de la théorie newtonienne et celles obtenues par la méthode des petites perturbations appliquée à $M_0 = \infty$, 10, 5 et 3. Le résultat pour $M_0 = 3$ est très voisin de celui de la théorie d'Ackeret (V. § 3.5). Nous avons donné également la pente en incompressible : $dC_z/d\alpha = 2\pi$ (V. §. 3.2).

Nous retiendrons qu'aux très grandes valeurs des nombres de Mach, la courbe C_z (α) a une *allure parabolique* et que les gradients de portance sont faibles. L'aspect du calcul signalé ici n'a pas grand intérêt du point de vue des applications car les échauffements cinétiques conduisent à utiliser en hypersonique des profils à bord d'attaque arrondi, c'est-à-dire avec choc détaché. Par ailleurs, la couche limite sur une surface plane, par la très grande épaisseur de déplacement qui est la sienne, déforme le corps (ainsi une plaque plane ne se comporte plus comme telle et donne lieu à une variation continue de la pression par *interaction visqueuse*). De plus, le comportement thermodynamique du fluide rend illusoire les calculs hypersoniques (M_0 grand) dans lesquels on utilise les formules habituelles en faisant tendre M_0 vers l'infini et en gardant γ constant.

L'expérience confirme cependant l'allure parabolique des courbes de portance.

Sur le plan des applications, les calculs et les expériences concernent des formes à nez arrondi (têtes de rentrée) et des véhicules spatiaux : planeurs hypersoniques avec aile à gros bord d'attaque et à très grande flèche (V. § 6.5) et navettes spatiales étudiées dans la décennie 1970-80 (V. § 6.6).

4. AÉRODYNAMIQUE DES AILES D'ENVERGURE LIMITÉE

4.1. Ailes droites d'allongement modéré en subsonique

4.1.1. L'aile d'envergure limitée, les tourbillons marginaux. — Les ailes d'envergure infinie, telles que celles considérées par les théories du profil d'aile, naturellement n'existent pas. Dans les cas réels, l'envergure des ailes est limitée ; leur allongement λ, défini comme le quotient de l'envergure et de la corde du profil moyen, et plus précisément comme le quotient b^2/S du carré de l'envergure et de la surface, est fini. Dans ce cas, les extrémités sont le siège de phénomènes physiques d'importance fondamentale. Le schéma de ces phénomènes, en écoulement amont subsonique, découvert, puis expliqué par Ludwig Prandtl en 1917-1919, est le suivant : sur toute l'aile, mais notamment au voisinage des extrémités, la nappe d'air qui est passée sous l'*intrados* à haute pression, tend à s'échapper latéralement vers celle qui est passée sur l'*extrados* à fortes dépressions. Aux extrémités, ce contournement donne naissance à deux tourbillons, appelés « tourbillons marginaux » (fig. I-29).

Ces tourbillons sensiblement coniques s'échappent ensuite vers l'aval, en recueillant (fig. I-30) toute la nappe d'écoulement visqueux qui a léché les deux faces de l'aile. C'est la vapeur d'eau issue des réacteurs qui, s'enroulant aussi autour de ces cœurs tourbillonnaires, permet de les voir lorsqu'on observe le passage d'un avion à haute altitude.

Mais ces tourbillons induisent sur l'ensemble de l'aile des vitesses verticales descendantes $\vec{w}$ perpendiculaires à $\vec{V_0}$ qui viennent réduire l'incidence aérodynamique à une valeur inférieure à l'incidence géométrique. Il s'ensuit que la

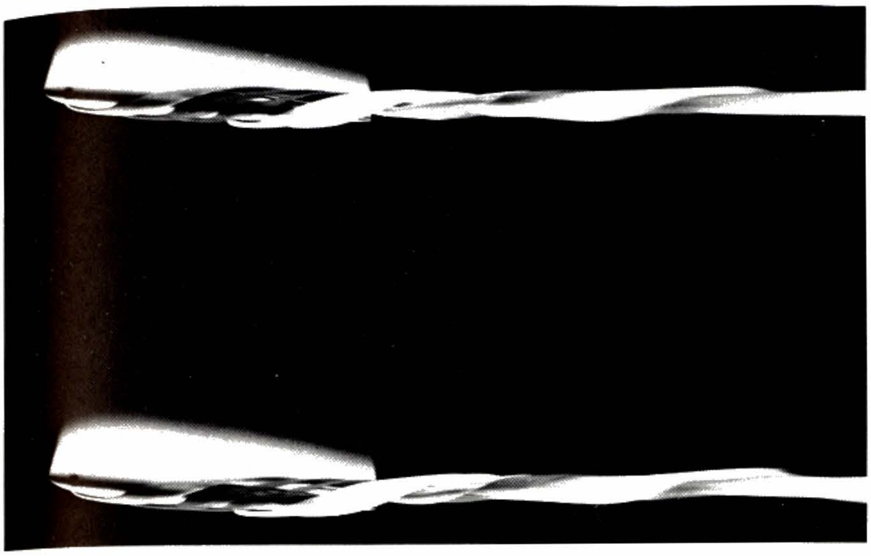
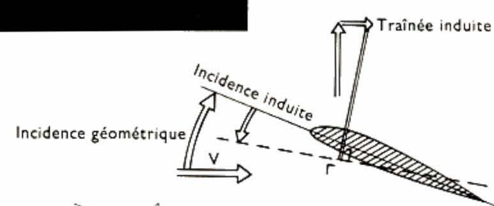


Fig. I-29
(*O.N.E.R.A.*)



résultante des forces n'est plus perpendiculaire à la vitesse amont et que la composante de portance s'accompagne à présent d'une composante de traînée, ce qui lève le paradoxe de d'Alembert, établi en fluide non visqueux, pour les ailes d'allongement infini.

Cette composante de traînée, proportionnelle à la fois à l'incidence et à la composante de portance, est ainsi proportionnelle au carré de cette dernière : la polaire d'une aile d'allongement fini, en fluide non visqueux, est parabolique ; la polaire réelle, décalée de C_x, dû à la viscosité, reste également voisine d'une parabole.

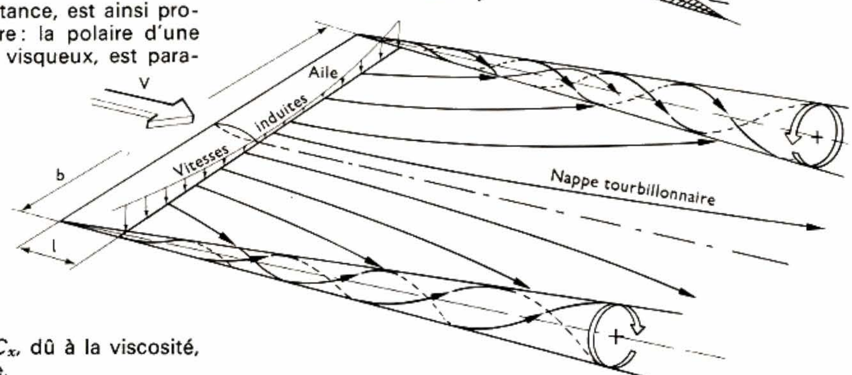


Fig. I-30

Tourbillons marginaux et vitesses induites sur une aile d'allongement $\lambda = \frac{b}{l}$ fini

La traînée induite C_{xi}, correspondant à une valeur C_z, s'écrit très simplement : $C_{xi} = \frac{C_z^2}{\pi\lambda}$ (polaire induite). Cette expression n'est applicable en toute rigueur que pour une aile où la distribution de portance en envergure est elliptique (w = constante sur toute l'envergure), et c'est la raison de la forme elliptique donnée aux ailes de certains avions tels les célèbres « Spitfire » anglais de la seconde guerre mondiale. Mais les ailes de formes rectilignes et à faible flèche ont des distributions peu différentes qui justifient l'usage de la formule, en apportant à l'allongement λ un facteur correctif voisin de 1, mais qui dépend de la forme en plan. La formule ci-dessus montre l'intérêt d'un grand allongement — nonobstant les difficultés constructives — pour des avions subsoniques volant normalement dans des conditions telles que le coefficient C_z est grand. Les mêmes observations valent pour l'empennage horizontal, et pour la dérive en cas de dérapage ; le fuselage de l'avion ajoute une traînée de forme qui dépend peu de l'incidence. Ainsi la polaire d'un avion complet demeure encore sensiblement une parabole. Une polaire réelle, celle d'un avion de transport à quatre réacteurs de 1970, est représentée sur la figure I-31 : la finesse maximale, correspondant au point où la polaire admet une tangente issue du point origine, est de 17 et correspond à une valeur de C_z en vol de 0,4.

L'allongement limité d'une aile, qui explique ainsi l'existence d'une traînée induite, a également un effet sur la portance : le gradient de portance en fonction de l'incidence — ou la portance pour une incidence donnée — diminue quand l'allongement décroît, selon une relation théorique qui dépend légèrement de la forme de l'aile et du

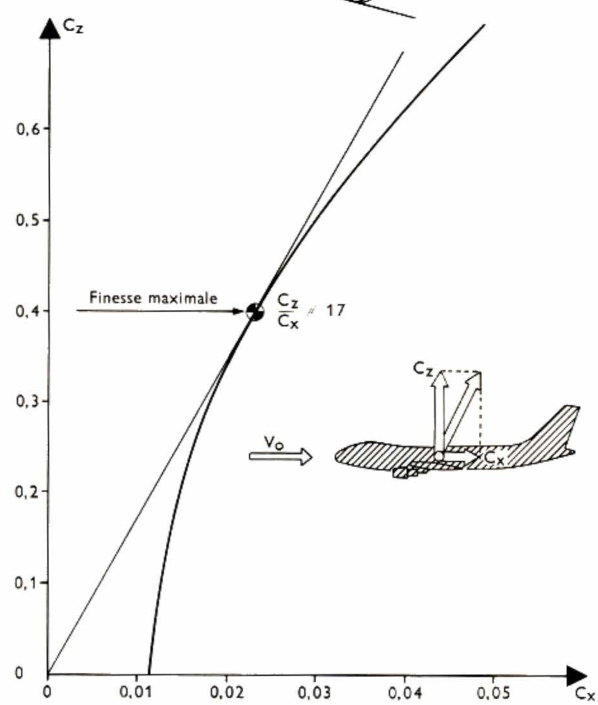


Fig. I-31 — Polaire de vol d'un avion subsonique moderne

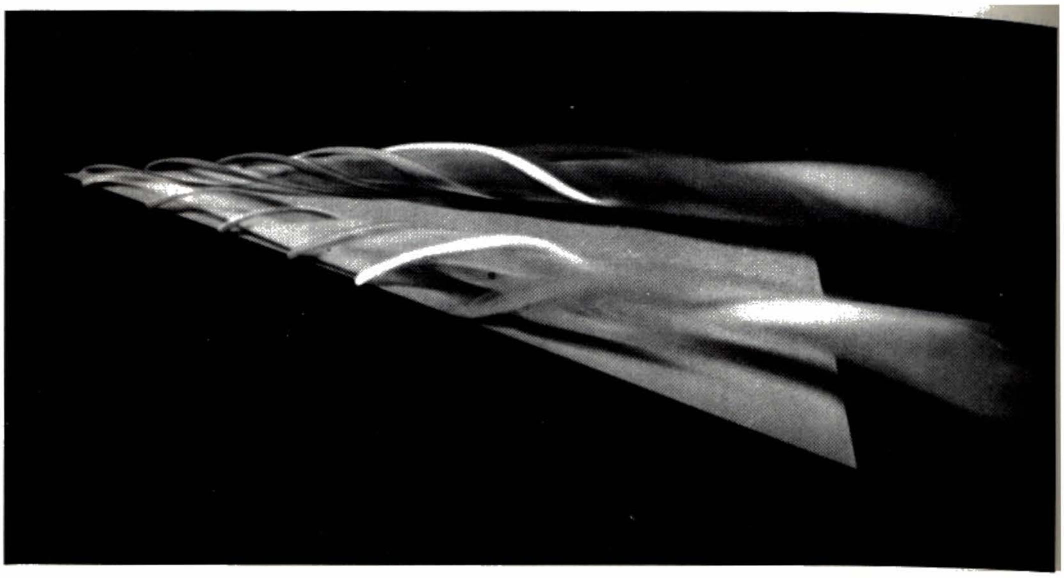


Fig. I-32
(*O.N.E.R.A.*)

gradient de portance du profil en allongement infini. On sait donc calculer la polaire d'une aile d'allongement donné à partir de celle du profil d'aile (formules de réduction d'allongement). Ces formules sont utilisables en écoulement à faible nombre de Mach, mais des considérations théoriques permettent de calculer l'effet de la compressibilité sur le gradient de portance d'une aile droite. Dans les applications on peut utiliser des formules approchées, qui interprètent de nombreux résultats partiels, telle celle de Diehl :

$$\frac{dC_z}{d\alpha^0} = 0{,}1 \cdot \frac{\lambda}{1{,}8 + \lambda} \quad \text{(avec } \alpha \text{ en degrés)}$$

applicable pour des allongements λ supérieurs à 3 environ.

4.1.2. L'aile de faible allongement, ou aile élancée. Pour les ailes d'allongements très faibles, voisin de 1,5 à 2,5, et à flèche accentuée ($\varphi > 45°$) — appelées aussi ailes élancées —, utilisées pour les avions supersoniques, on peut utiliser la formule suivante :

$$\frac{dC_z}{d\alpha} = \frac{\pi\lambda}{2} \cdot \frac{4{,}9}{4{,}9 + \lambda}$$

où l'on multiplie par le facteur : $\frac{4{,}9}{4{,}9 + \lambda}$ le résultat de la théorie des ailes élancées, applicable seulement à Mach 1 (c'est-à-dire pour les très grandes flèches). Dans cette relation l'incidence est exprimée en radians.

Sur les ailes triangulaires, ou en delta, utilisées sur les avions supersoniques, le vol aux vitesses subsoniques s'accompagne aussi d'un écoulement tourbillonnaire mais les tourbillons, qui n'apparaissent sur l'aile qu'à partir d'incidences voisines de 5 à 6 degrés, ont l'aspect de cornets issus de la pointe de l'aile (fig. I-32). Aux incidences de décollage, voisines de 12 à 15°, ces tourbillons induisent sur l'aile des dépressions qui viennent augmenter notablement la portance ; la figure I-33 montre le pourcentage de cette portance supplémentaire, rapporté à la portance totale, pour les ailes d'allongements compris entre 0,1 et 1,7, placées à incidence 12°, tel qu'il ressort d'essais effectués par l'O.N.E.R.A. (fig. I-33 b). La courbe qui relie portance et incidence n'est donc pas linéaire dans le domaine des incidences où ces tourbillons en cornet sont bien organisés ; la traînée induite est également supérieure à celle obtenue par la théorie de l'aile élancée. Pour une certaine incidence supérieure à 25°, et variable avec l'allongement, l'écoulement tourbillonnaire se désorganise : on dit que les tourbillons « éclatent » ; la portance devient alors

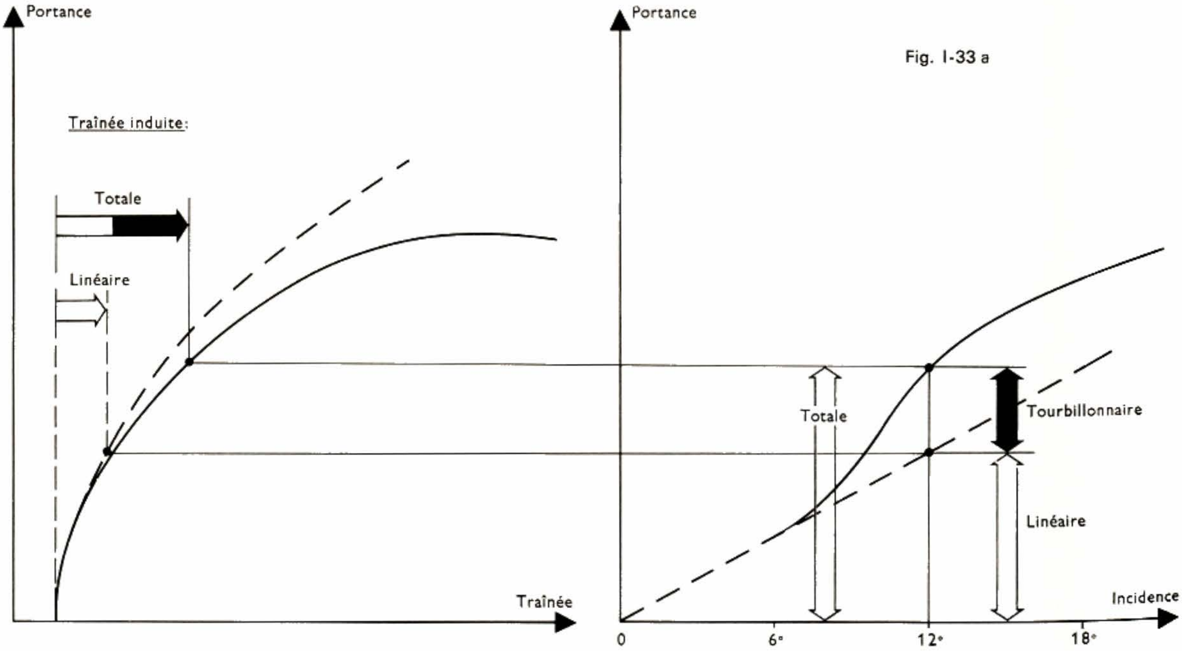


Fig. I-33 a

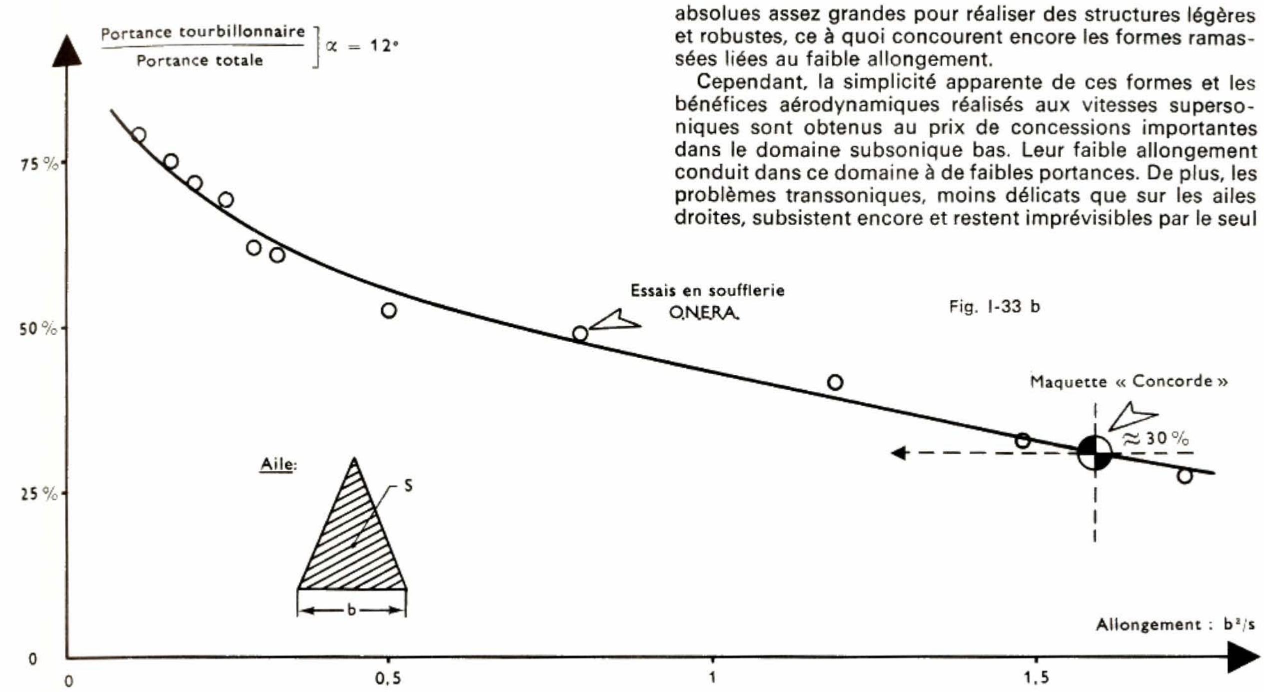


Fig. I-33 b

de nouveau égale, puis inférieure à la portance linéaire. Notons qu'à l'allongement de « Concorde », voisin de 1,6 correspond une portance supplémentaire proche de 30 % pour une incidence voisine de 12°. Une théorie récente (Polhamus, 1966) permet de calculer avec précision cette portance tourbillonnaire.

4.2. La compressibilité; l'aile en flèche, l'aile en « delta ». — La compressibilité de l'air aux vitesses de vol qui approchent la vitesse du son affecte, nous l'avons vu précédemment (V. § 3.4), les propriétés des profils: ondes de choc et décollements de la couche limite augmentent les traînées, réduisent la portance et perturbent gravement les moments; ces derniers effets sont en outre aggravés par leur aspect instationnaire (flottement transsonique). Deux Allemands, Busemann et Betz (1935), ont eu l'idée, afin de différer l'apparition de ces phénomènes et de réduire leur intensité, de rabattre les ailes vers l'arrière, à la manière des flèches, dont le nom est resté à ce type d'ailes. La considération du Mach et de l'incidence de la composante de vitesse normale au bord d'attaque en écoulement bidimensionnel ont montré, en effet, qu'on obtient la même distribution de pression sur des profils de 10 % d'épaisseur relative, par exemple, dans les trois cas suivants:

a) Pas de flèche (aile droite), nombre de Mach = 0,5, incidence = 6°

b) Flèche de 35°, Mach = 0,611, incidence = 4,9°

c) Flèche de 57°, Mach = 0,918, incidence = 3,3°

Sur une aile d'envergure limitée, le bénéfice de cet effet d'« attaque oblique » revient donc à pouvoir s'approcher de la vitesse du son, en retardant l'apparition des phénomènes de compressibilité signalés ci-dessus; il existe cependant toujours un nombre de Mach où apparaissent des anomalies d'écoulement.

Les progrès réalisés sur la structure des avions, en particulier la réduction des épaisseurs relatives des ailes, ont encore permis d'accroître les vitesses critiques, cependant inférieures à la vitesse du son et de réduire l'intensité des anomalies transsoniques; l'idée des ailes triangulaires, ou en « *delta* », ainsi nommées d'après la forme majuscule de cette lettre grecque, est comme une limite de l'aile en flèche: cette disposition, qui est celle de nombreux avions allant des « Mirages III et IV » à « Concorde », permet de conserver à la fois des épaisseurs relatives faibles, des bords d'attaque fortement rabattus vers l'arrière et des épaisseurs absolues assez grandes pour réaliser des structures légères et robustes, ce à quoi concourent encore les formes ramassées liées au faible allongement.

Cependant, la simplicité apparente de ces formes et les bénéfices aérodynamiques réalisés aux vitesses supersoniques sont obtenus au prix de concessions importantes dans le domaine subsonique bas. Leur faible allongement conduit dans ce domaine à de faibles portances. De plus, les problèmes transsoniques, moins délicats que sur les ailes droites, subsistent encore et restent imprévisibles par le seul calcul. Ils exigent d'importantes recherches expérimentales dans les souffleries transsoniques (V. §. 7.4), pour détecter notamment les anomalies de stabilité qui sont évoquées plus loin.

Les strioscopies de la figure I-34 montrent les ondes de choc sur la maquette d'un projet de chasseur. À Mach = 0,95, une première onde est provoquée par l'habitacle du pilote, une seconde intéresse la partie de l'aile où se trouvent les ailerons, une troisième intéresse l'empennage et la dérive;

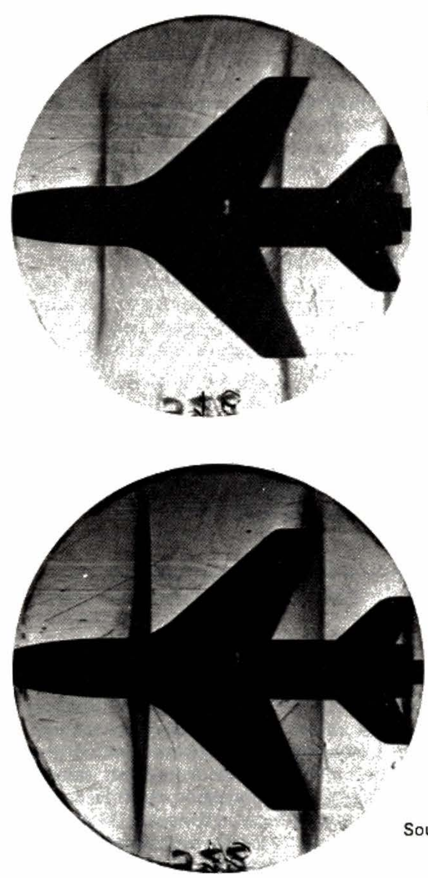


Fig. I-34
Écoulement transsonique sur une maquette de chasseur

M = 0,95

M = 0,975

Soufflerie S-5 Chalais

(*O.N.E.R.A.*)

à Mach = 0,975 les ondes de choc se sont intensifiées (traînée accrue) mais ont reculé et dégagé les ailes et les surfaces de gouvernes.

La présence des ondes de choc sur les surfaces de contrôle de l'avion sont à l'origine des anomalies transsoniques de stabilité exposées plus loin ; dans le cas présent, un meilleur dessin du fuselage, conformément à la « loi des aires », supprime les ondes de choc sur l'arrière de l'avion et rétablit la stabilité de route à $M = 0{,}95$, ainsi qu'il fut vérifié par les essais dans la soufflerie S-5 Chalais, de l'O.N.E.R.A., où ont été réalisées ces strioscopies.

Concernant la portance et la traînée, l'approche de la vitesse du son conduit à une modification considérable de l'écoulement sur l'aile. Sur les profils d'ailes d'allongement infini, et sur les ailes droites (sans flèche), ces modifications se produisent à partir de $M = 0{,}9$ environ (V. § 3.3 et § 3.4). Quand le bord d'attaque est en flèche, l'écoulement sur l'aile est supersonique pour Mach supérieur à 1, mais plusieurs cas (fig. I-35) sont à considérer, par exemple pour une aile plane en delta.

— Dans un premier cas, le nombre de Mach est assez faible pour que la ligne de Mach issue de la pointe de l'aile soit en avant du bord d'attaque. Comme nous l'avons vu (V. § 2.1), la projection de la vitesse sur la normale à la ligne de Mach est égale à la vitesse du son a et la projection sur la normale au bord d'attaque lui est alors inférieure : on dit que le bord d'attaque est « subsonique ». Pour une aile en delta équilatéral, la flèche est égale à 60° et dans ce cas, l'on est entre Mach 1 et Mach 2.

Voler en supersonique, tout en restant dans le cas du bord d'attaque subsonique, entraîne d'importantes conséquences pour la traînée de l'aile (on conserve en effet une partie de l'effet de succion : V. § 3.2), et surtout permet d'utiliser des profils du type subsonique avec le bénéfice de l'adaptation : c'est l'une des raisons du choix d'une flèche accentuée pour le transport supersonique « Concorde ». Les formes sinueuses caractéristiques des profils de l'aile de cet avion résultent des calculs d'adaptation à Mach 1 en présence du fuselage et des conditions de stabilité dans le domaine des vitesses d'atterrissage et de décollage.

— Dans un second cas, le nombre de Mach est tel que les « lignes de Mach » interceptent l'aile : on dit que le bord d'attaque est supersonique ; dans le cas réel d'une aile d'épaisseur non nulle, les ondes de choc restent cependant liées aux bords d'attaque. Pour une aile en delta équilatéral, c'est la configuration correspondant à $M \geqslant 2$; les pressions dans la zone comprise entre le bord d'attaque et la ligne de Mach sont celles issues de la théorie linéaire pour une aile d'allongement infini en attaque oblique. Il n'y a plus alors d'effet de succion favorable sur la traînée. Dans la partie centrale, entre les lignes de Mach, les pressions varient en envergure et sont également calculables par diverses théories, par exemple, la théorie des mouvements coniques. L'intégration des pressions à l'intrados et à l'extrados de l'aile est encore donnée, par suite de la linéarisation des équations, par la formule d'Ackeret : $\dfrac{dC_z}{d\alpha^0} = \dfrac{0{,}0698}{\sqrt{M^2 - 1}}$.

Pour un certain nombre de Mach, bord d'attaque et ligne de Mach sont confondus ; le bord d'attaque est dit sonique. Le tableau ci-après indique, pour différents angles de flèche du bord d'attaque, les nombres de Mach qui le rendent sonique.

Flèche	45°	50°	60°	70°	75°
M	1,414	1,56	2	2,91	3,85

La théorie linéaire de l'aile met en évidence une singularité pour chacune des valeurs du nombre de Mach qui rendent soniques les droites caractérisant la forme en plan, ou la forme du profil de l'aile. Ainsi, pour l'aile en delta de flèche 60°, deux singularités apparaissent dans la courbe théorique du coefficient de portance en fonction du nombre de Mach : pour $M = 1$ et $M = 2$ (C_z en théorie linéaire est indépendant de la forme du profil).

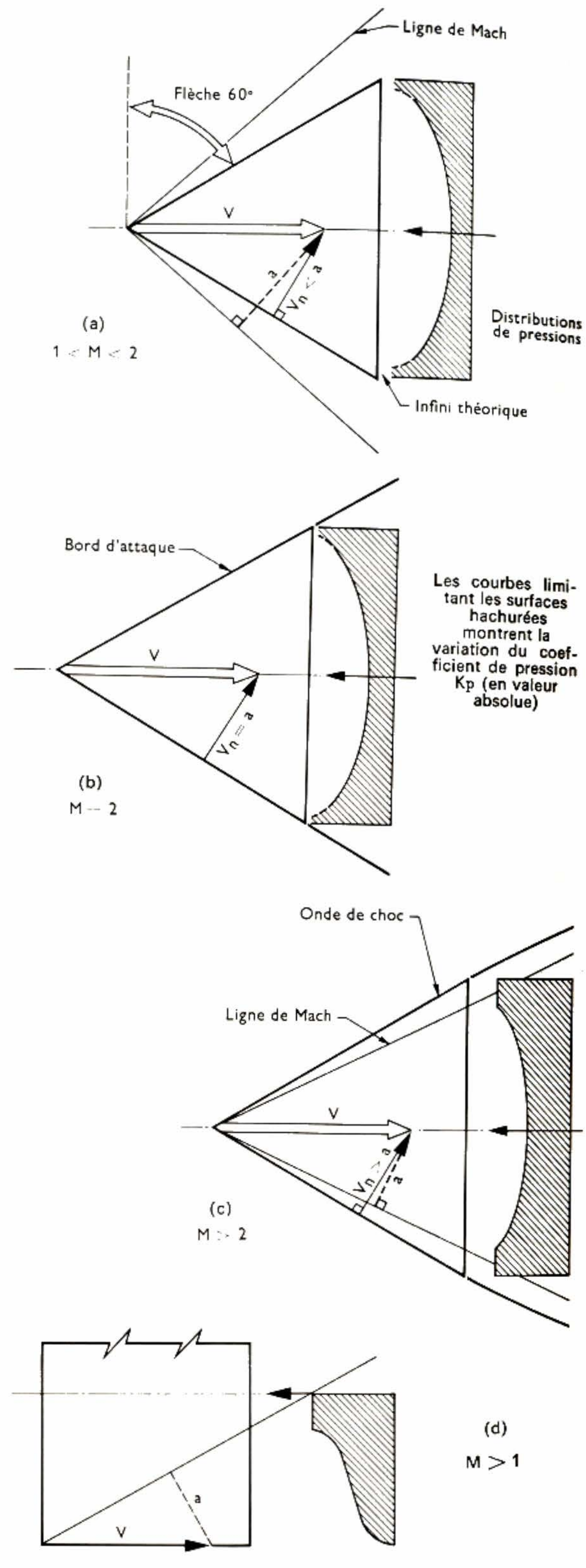


Fig. I-35 — a, b et c : ailes en delta à bord d'attaque subsonique, sonique et supersonique ; d : aile rectangulaire en supersonique

La figure I-36 reprend les résultats théoriques pour les deux flèches 60° et 75° et situe le cas d'un avion connu, ainsi que celui d'un planeur hypersonique de très forte flèche. Notons que plus faible est l'allongement et plus réduites sont les variations du gradient de portance quand le nombre de Mach varie. Cette propriété de quasi-inva-

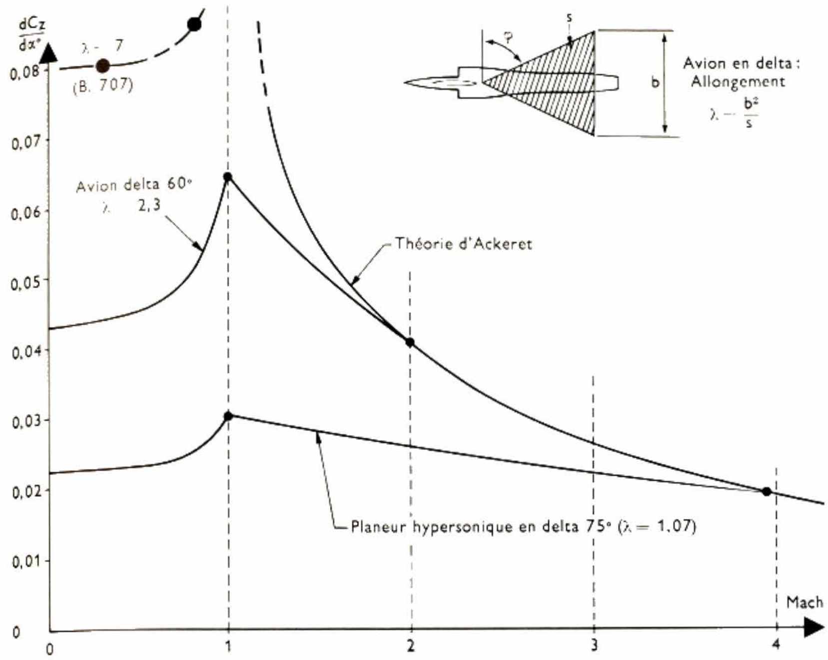


Fig. I-36

riance est recherchée pour certains missiles appelés à voler dans un large domaine de vitesses.

Dans le cas d'ailes trapézoïdales à faible flèche (par exemple, les ailettes de la fusée, V. fig. I-49) le vol en supersonique laisse subsister, en extrémité d'aile, une zone d'écoulement non uniforme comprise entre la ligne de Mach issue du bord d'attaque du profil extrême et l'extrémité de l'aile. Dans cette zone, les pressions évoluent de telle façon que la portance est moitié de celle de la zone de type supersonique. La portance globale est alors sensiblement inférieure au résultat de la théorie linéaire pour l'aile d'allongement infini. À Mach croissant la zone non uniforme se réduit avec la fermeture du cône de Mach et son influence devient négligeable pour *M* supérieur à 3 environ.

5. AVION

5.1. Généralités. — L'architecture générale des avions est toujours basée sur la combinaison des trois éléments essentiels suivants :

— *L'aile* chargée de développer la portance nécessaire, au prix de la traînée la plus faible possible ; à ses extrémités elle comporte les ailerons qui commandent les mouvements d'inclinaison latérale de l'avion et par conséquent participent aux changements de direction ainsi qu'il est expliqué en mécanique du vol (V. chap. 3) ; le reste de l'envergure est occupé en général par des volets hypersustentateurs destinés à accroître le coefficient de portance aux faibles vitesses d'atterrissage et de décollage. On leur associe des becs de bords d'attaque qui évitent (V. § 3.2.2) les décollements parfois provoqués par la sortie des volets.

— *Le fuselage*, où sont logés les équipages, les passagers, le fret, parfois les réserves de carburant, etc., dont la forme dépend moins d'impératifs aérodynamiques que de nécessités structurales (forme cylindrique imposée par la pressurisation) et opérationnelles : dégager la vue de l'équipage et assurer la garde au sol de la partie arrière lors du décollage cabré.

— *Les empennages :* l'empennage horizontal qui commande l'assiette de l'avion et les changements d'incidence, est soit partiellement, soit entièrement mobile. L'empennage vertical comporte une partie fixe (appelée aussi dérive), qui assure la stabilité de route, et une partie mobile qui assure les changements de route en conjugaison avec les ailerons.

L'avènement des avions en delta, privés d'empennage horizontal séparé, a fait apparaître des difficultés de pilotage. Ce pilotage est, en effet, obtenu par des *élevons* (mot composé par les Anglo-saxons et provenant de la contraction de *elevator* et *ailerons*) situés à l'arrière de l'aile. La distance entre le centre de gravité et ces élevons étant nécessairement faible, leur efficacité est donc réduite. Pour un avion civil qui manœuvre peu, ce défaut n'est pas grave et l'on sait même calculer théoriquement la forme de l'aile (vrillages et cambrures) pour qu'en vol supersonique l'équilibre longitudinal soit réalisé sans braquer les élevons, ce qui minimise la traînée de l'ensemble. Mais pour les avions supersoniques militaires modernes, destinés à évoluer à basses vitesses comme à des vitesses supersoniques, tout en emportant de lourds armements, on est revenu à une formule avec empennage horizontal : tels sont les avions M.D. F1 (français), Phantom F4 (américains) et MIG 21 (soviétiques). Cependant, même sur ces avions demeure une difficulté : la force verticale dirigée vers le bas qu'exerce l'empennage horizontal lorsqu'on veut cabrer l'avion, vient réduire la portance totale, qu'il faut alors restaurer par un accroissement d'incidence. Une idée simple consiste alors à disposer l'empennage à l'*avant* de l'aile selon la disposition dite en « canard » ; dans ces conditions, la force d'équilibrage dirigée vers le haut vient s'ajouter, et non plus se soustraire, à la portance de l'aile (V. fig. I-37). Il est intéressant de noter que telle était la disposition adoptée sur les premiers avions construits par les frères Wright. Sur les avions supersoniques, l'avantage de cette disposition s'accompagne en vol subsonique élevé de certaines difficultés de stabilités longitudinale et transversale, liées à la déflection de l'air et aux tourbillons issus de ce plan canard, qui interactionnent avec les surfaces placées à l'aval. L'avion Dassault « Mirage-Milan » a avantageusement exploité les avantages d'un plan avant, appelé « moustache » par son constructeur, et en a évité les difficultés en escamotant cet élément pendant le vol à grande vitesse (V. fig. I-38).

Un autre problème aérodynamique propre aux avions supersoniques tient aux différences profondes de l'écoulement sur les ailes (V. § 3.5) dans les domaines subsonique et supersonique. L'étude des profils d'aile a montré que le passage de la vitesse du son est marqué par le recul du centre de poussée qui passe du quart avant de la corde à la moitié de cette corde. Il en est de même, avec de petites variations selon la forme des ailes, pour l'avion complet. Si donc l'avion est stable en subsonique (centre de gravité en avant du centre de poussée), il sera trop stable, donc difficile à piloter en supersonique ; l'étude de la mécanique du vol (V. chap. 3) montre que la manœuvrabilité est maximale quand, centres de poussée et de gravité étant confondus, l'avion est en équilibre indifférent. Sans recher-

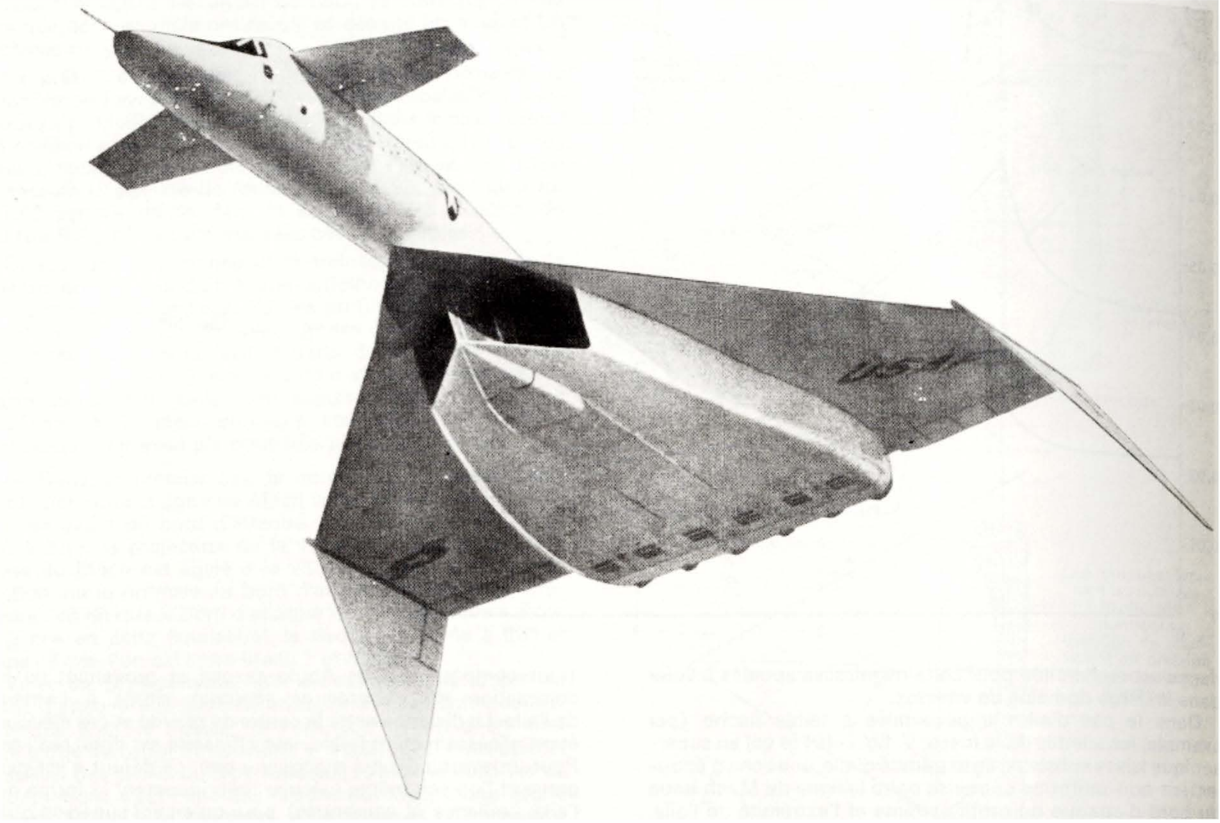


Fig. I-37 — « X B 70 » North American (*Aviation Week*)



Fig. I-38 — Mirage « Milan » Marcel Dassault (*Air et Cosmos*)

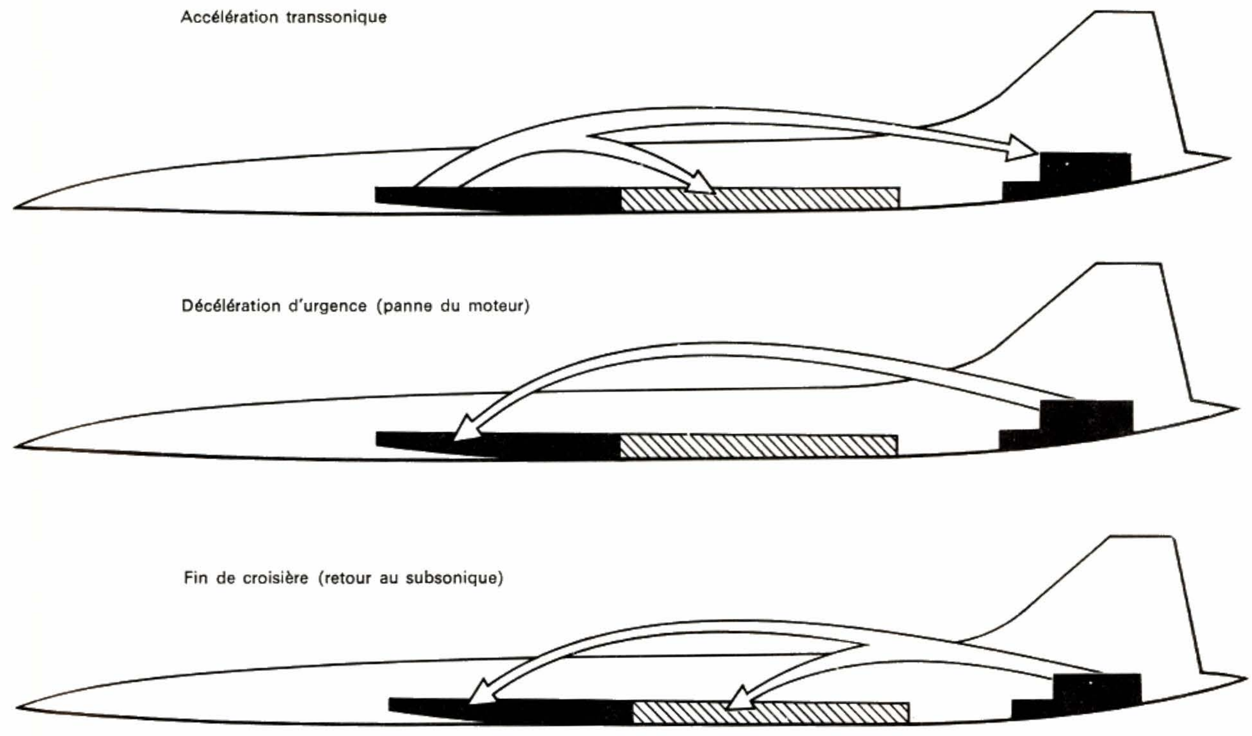


Fig. I-39 — Dans un avion de transport supersonique, les déplacements du centre de poussée aérodynamique, selon les régimes de vol, sont compensés par des déplacements du centre de gravité obtenus par des transvasements de carburant entre les réservoirs extrêmes (en noir) et les réservoirs principaux (hachurés)

cher une telle situation, on souhaite cependant s'en approcher ; un expédient dans ce sens consiste à contrôler la position du centre de gravité selon les régimes de vol (fig. I-39), par exemple, en transvasant du carburant des réservoirs avant aux réservoirs arrière, ou inversement.

5.2. L'avion à flèche variable. — Le grand nombre de difficultés aérodynamiques soulevées par le vol lent des ailes adaptées au vol rapide a conduit à étudier un avion dont l'aile changerait de forme selon les régimes de vol.

C'est en avril 1965 que l'avion américain F-111 expérimentait un tel dispositif pour la première fois ; les progrès de la technique de la construction ont rendu possible une telle réalisation, suivie en U.R.S.S., puis en France, où les usines Dassault faisaient voler une version monomoteur, le G-1 en 1969, puis une version à deux moteurs, le G-8, en 1971. Les recherches aérodynamiques ont eu pour but de définir la position des pivots des ailes mobiles telle que le centre de poussée aérodynamique varie le moins possible pendant le pivotement, et d'établir le meilleur compromis entre les surfaces pivotantes et le tronçon triangulaire fixe. La figure I-40 extraite d'une telle recherche aérodynamique en soufflerie, conduite à l'O.N.E.R.A., montre que pour la position du pivot à 30 % de l'envergure, la variation du centre de poussée en subsonique est annulée ; l'accélération jusqu'à Mach 2,1 avec les ailes repliées à 70° s'accompagne de l'inévitable recul transsonique.

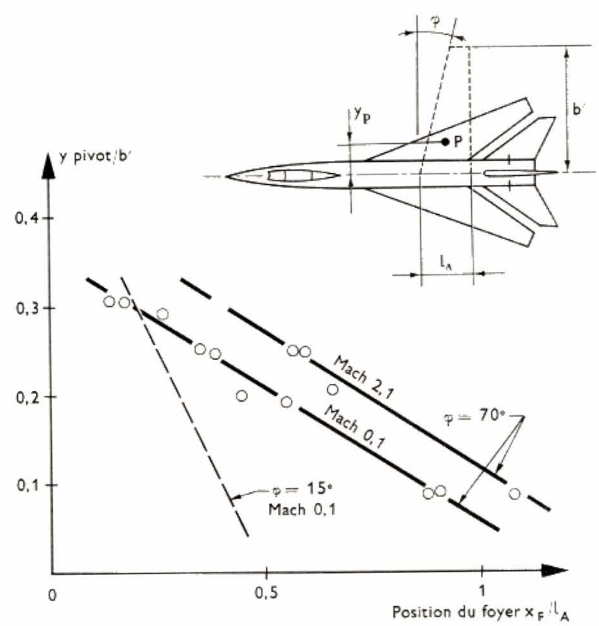
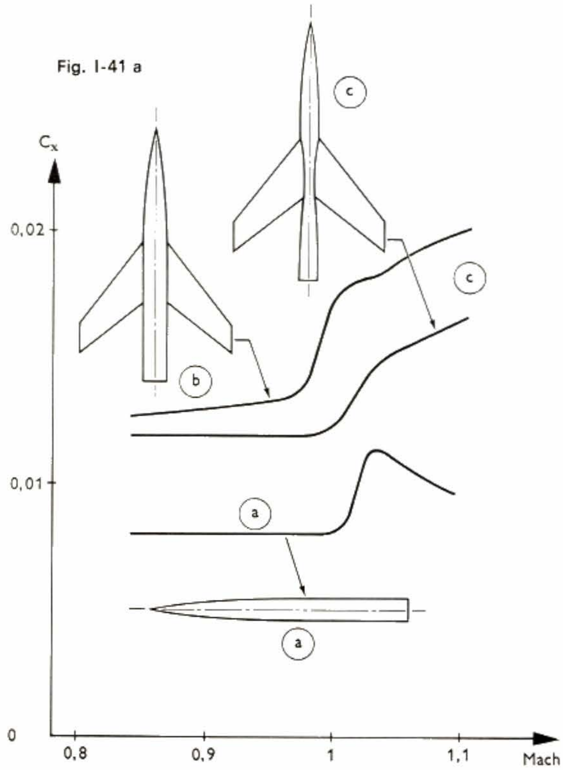


Fig. I-40 — Étude d'un avion à flèche variable. Recul du foyer en fonction de la position du pivot en envergure

5.3. La loi des aires. — Les divers éléments d'un avion exercent les uns sur les autres des interactions aérodynamiques ; c'est ainsi qu'un empennage fonctionne dans le courant défléchi par l'aile. Cet effet, très important en subsonique, modifie considérablement l'efficacité de l'empennage. Il a été également reconnu depuis longtemps que la liaison de l'aile et du fuselage devait, pour éviter la formation de tourbillons parasites, être habillée de formes les plus continues possibles ; ces carénages ont porté longtemps le nom de « Karman », nom du savant qui les avait préconisés. Karman lui-même établit, dès 1935, une formule qui montre que la résistance d'un corps en vol sonique est minimisée quand on assure une bonne continuité de variation des aires des sections transversales ; plus récemment (1955), Richard T. Whitcomb comprit le premier que la présence des ailes sur un fuselage cylindrique violait cette continuité, ou *loi des aires*. Il proposa donc de compenser l'aire transversale de l'aile par un amincissement correspondant du fuselage. Les premiers avions auxquels fut appliquée cette correction présentaient ainsi une forme en taille de guêpe très caractéristique ; aujourd'hui le respect de cette loi des aires est assuré au niveau de la conception de la cellule, dont les volumes sont répartis en conséquence, et les formes finales plus continues dénoncent moins visiblement ce raffinement. La figure I-41 a

Fig. I-41 a



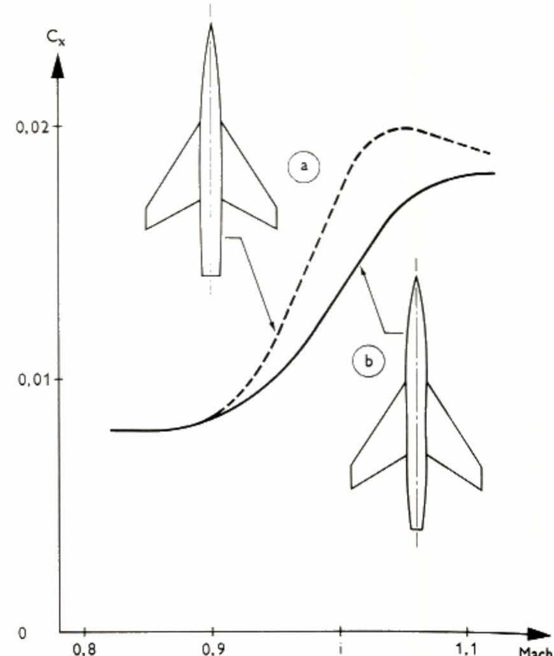


Fig. I-41 b

Essais en soufflerie
(*O.N.E.R.A.*)

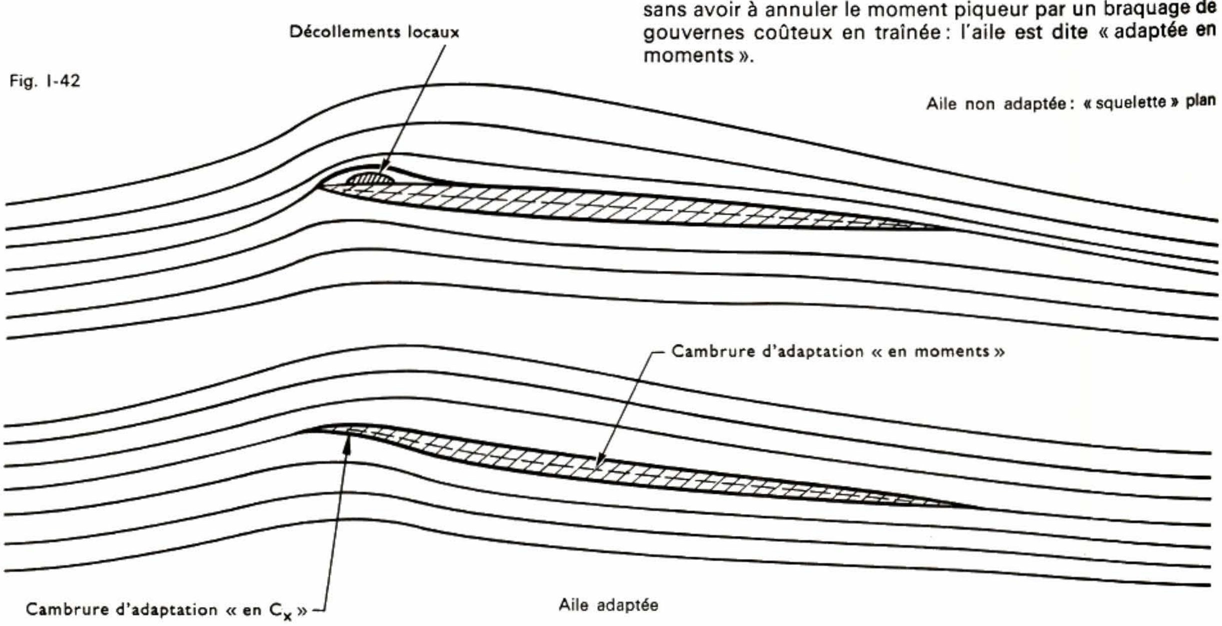
En pinçant le fuselage pour compenser la section transversale des ailes, on réduit la résistance transsonique, mais on a réduit le volume utile du fuselage (essais américains). Sur la figure à droite relative à des essais de l'O.N.E.R.A. on a conservé le volume du fuselage en compensant le pincement des ailes par des renflements modérés à l'avant et à l'arrière ; le bénéfice est moins spectaculaire mais demeure. Les courbes de traînée C_x sont très différentes car il s'agit de deux séries d'essais sur des maquettes différentes

montre qu'en pinçant le fuselage pour compenser la section transversale des ailes on réduit bien la résistance transsonique, mais on a également réduit le volume utile du fuselage ; sur la figure I-41 b, on a conservé le volume initial du fuselage en compensant le pincement au droit des ailes par des renflements modérés à l'avant et à l'arrière ; le bénéfice est moins frappant mais demeure.

Les courbes de traînée sont différentes car il s'agit de deux séries d'essais sur des maquettes différentes : en vol (États-Unis d'Amérique) et en soufflerie (O.N.E.R.A.).

5.4. L'adaptation. — Si les formes élancées des ailes modernes ont posé des problèmes pour le vol à basse vitesse, l'amincissement extrême de leurs profils pose aussi ses propres problèmes. Les bords d'attaque n'offrent plus à l'air un arrondi suffisant pour assurer un bon contournement et éviter des décollements tourbillonnaires qui peuvent, sinon mettre en cause la sécurité à l'atterrissage et au décollage, du moins être générateurs de traînées parasites pendant le vol de croisière. Des recherches guidées par calculs, utilisant la méthode des analogies rhéoélectriques en subsonique et des méthodes d'analyse numérique en supersonique, ont conduit à donner à la zone du bord d'attaque des ailes une forme cambrée vers le bas, pour les adapter à la direction des filets d'air (fig. I-42). Une seconde adaptation de la forme du profil consiste à donner au squelette du profil une forme à double courbure pour obtenir l'équilibrage de l'avion au coefficient C_z de croisière sans avoir à annuler le moment piqueur par un braquage de gouvernes coûteux en traînée : l'aile est dite « adaptée en moments ».

Fig. I-42



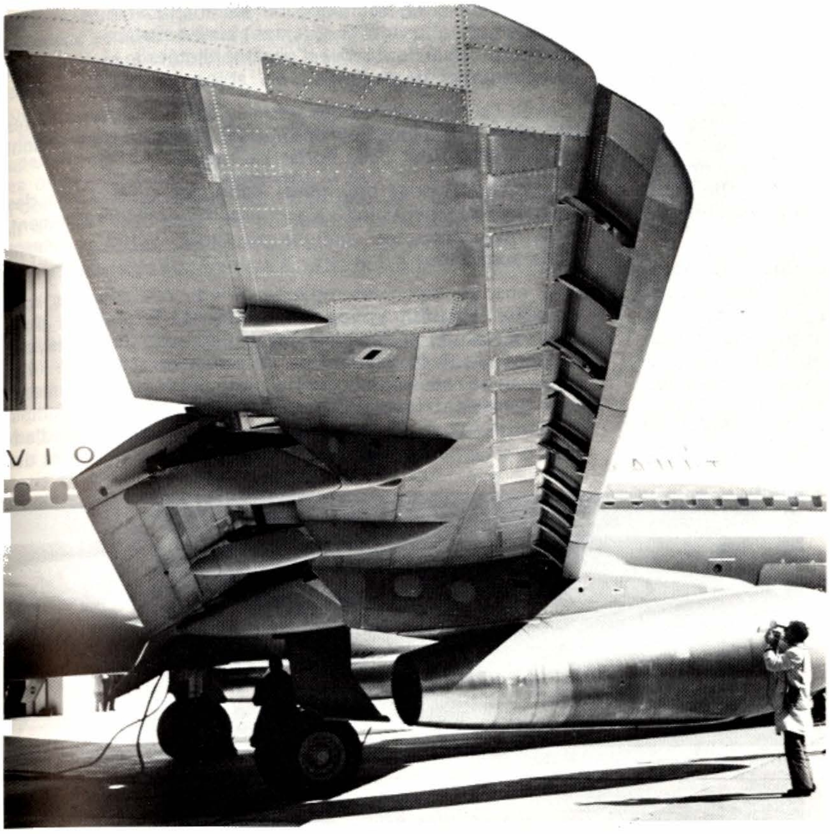


Fig. I-43

Profil hypersustentateur à fentes utilisé sur l'avion « Mercure » (*Air et Cosmos*)

Ces diverses courbures — qui varient le long de l'envergure — et se superposent à une variation des incidences de chaque profil, appelée vrillage, concourent à donner aux ailes des avions supersoniques modernes, qu'il s'agisse du Tupolev 144 ou du Concorde, leurs formes complexes caractéristiques.

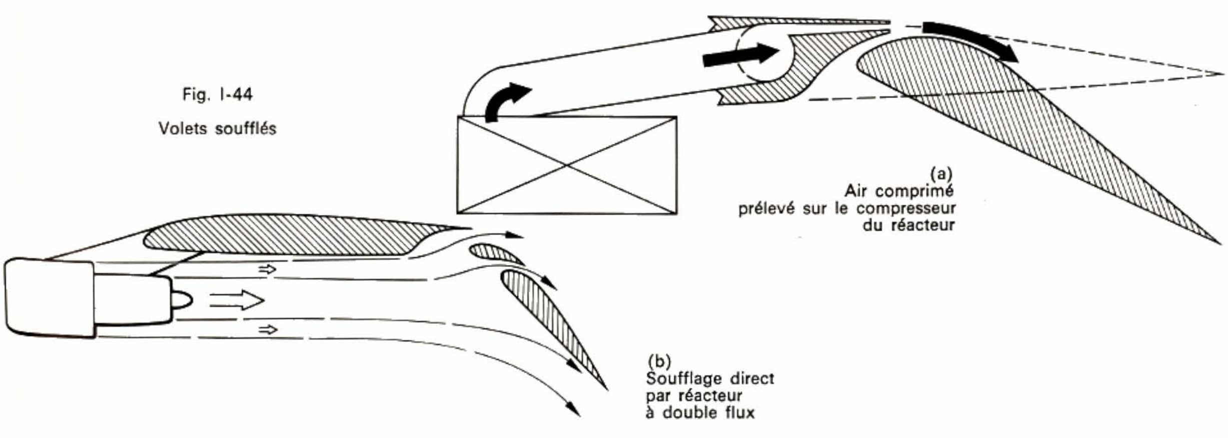
5.5. Hypersustentation et aérofreins

1° L'accroissement continu de la vitesse de vol des avions, qui a poussé à adopter les formes d'ailes les plus favorables à la vitesse de vol la plus grande, aurait fait croître démesurément les vitesses d'atterrissage et de décollage, si l'on n'avait recherché très tôt les moyens d'augmenter le coefficient de portance maximale à l'aide de dispositifs appelés hypersustentateurs. Les travaux théoriques ont montré l'intérêt de braquer un volet à l'arrière de l'aile (V. § 3.2.2), mais les essais ont montré aussi que l'efficacité réelle n'était qu'environ égale aux deux tiers de celle calculée et que de surcroît des braquages, même modérés, s'accompagnaient de décollements qui ruinaient la portance maximale escomptée. L'idée de déployer, à l'avant et à l'arrière de l'aile, des volets simples ou multiples, ménageant des fentes entre eux et la partie fixe de l'aile, a permis d'accroître les coefficients de portance disponibles. Un rôle essentiel est joué, dans cette disposition (fig. I-43) par le soufflage qu'exerce l'air issu de l'intrados et admis à l'extrados, et dont l'effet est de retarder le décollement de la couche limite. Ce dispositif est aujourd'hui universellement utilisé. La figure I-43 représente les volets de bord de fuite de l'avion « Mercure » - Marcel Dassault, du type à double fente, interrompus au droit du réacteur, et le volet de bord d'attaque, également interrompu par le pylône de suspension du réacteur. L'efficacité des volets à fentes est accrue lorsque le souffle des hélices est lui-même défléchi par les volets ; tel est le cas du Bréguet 941, où l'on tire plein parti de cet effet en employant des hélices de grand diamètre qui intéressent pratiquement toute l'envergure de l'aile.

Depuis l'avènement des moteurs à réaction, pour souffler sur les volets encore plus énergiquement que par l'effet naturel des fentes, on dispose d'air comprimé prélevé sur le compresseur du moteur (fig. I-44 a) ; une autre solution consiste à souffler directement sur les volets le flux d'air issu des réacteurs. Cette solution (fig. I-44 b) est devenue

Fig. I-44

Volets soufflés



(a)
Air comprimé prélevé sur le compresseur du réacteur

(b)
Soufflage direct par réacteur à double flux

particulièrement intéressante depuis l'utilisation de réacteurs à double flux et à forte dilution, c'est-à-dire où le jet central chaud issu du réacteur est gainé d'un jet froid d'un débit cinq à dix fois plus important, acceptable pour la structure des volets. La mise au point d'avions civils à décollage court, rendue possible par ces progrès, dépend des études où sont comparés les mérites des différentes dispositions ; facilité de construire la structure, tenue de la structure aux jets chauds, sécurité de l'avion en cas de panne, bruit au décollage et à l'atterrissage, sont les points principaux de ces comparaisons.

2° Sur les avions modernes qui atteignent de grandes finesses aérodynamiques, la descente depuis l'altitude de vol (10 km pour le Boeing 707, 16 à 18 km pour le Concorde) jusque vers le point d'atterrissage conduirait à des vitesses trop grandes pour les basses altitudes, et à des efforts insupportables pour les volets, trains d'atterrissage, portes de trains sortis durant cette phase de vol. Pour éviter ces inconvénients, les avions déploient alors des panneaux très robustes, placés perpendiculairement au courant d'air et appelés « aérofreins ». Selon la forme de l'avion ils sont placés soit sur les ailes, soit à l'arrière du fuselage, soit sous le fuselage, de façon à ce que leur sortie ne détériore pas la stabilité de l'avion.

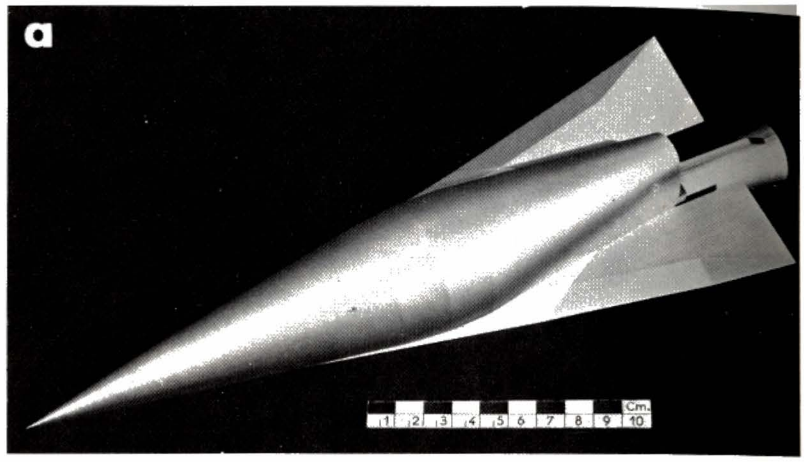
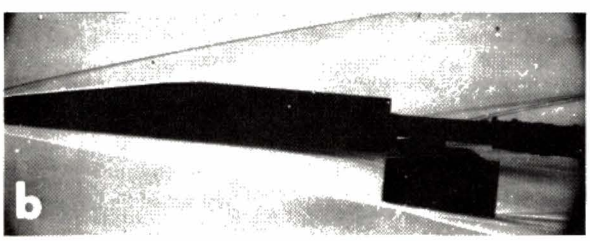


Fig. I-45 a

Engin hypersonique (*O.N.E.R.A.*)

Fig. I-45 b

Strioscopie (*O.N.E.R.A.*)



5.6. Problèmes aérodynamiques de la motorisation. — Il existe toujours une interaction entre l'aérodynamique de la cellule d'avion et la propulsion puisque c'est en communiquant à la partie de l'air ambiant capté par le propulseur un supplément de quantité de mouvement que le moteur propulse l'avion.

Sur les avions à hélice, cette interaction reste limitée, nous l'avons vu, à l'action du souffle de l'hélice sur l'aile, avec l'accroissement de portance qui l'accompagne, et à des effets secondaires sur les empennages.

Sur les avions à réaction, cette interaction prend des aspects plus complexes : l'alimentation de l'entrée d'air doit être correctement assurée, sans formation de tourbillons, ni de décollements ; on veille de même à ne pas capter les couches limites créées le long du fuselage, en écartant les entrées d'air de ce dernier ; le passage ainsi dégagé est appelé « piège à couche limite ». Sur les avions supersoniques, l'entrée d'air doit être conçue pour substituer à un choc normal un train de chocs obliques qui réduisent moins la pression d'arrêt (V. § 2.7). De même les sorties d'air, d'où s'échappe un jet chaud et puissant, ne doivent pas perturber l'écoulement sur les surfaces voisines : pour cette raison les sorties d'air sont rejetées le plus souvent à l'extrême arrière de l'avion.

Avec l'accroissement des vitesses de vol, ces contraintes imposées à la disposition des entrées et sorties d'air se sont compliquées pour deux sortes de raisons :

— d'abord, pour un même avion, les dimensions des sections de captation s'accroissent considérablement, ainsi que celles des sections de sortie quand la vitesse visée augmente ;

— ensuite, selon les régimes de vol, ces sections sont appelées à varier. En ce qui concerne les entrées d'air, cela est réalisé par déplacement de panneaux ou de noyaux internes destinés à ramener l'écoulement capté à l'état subsonique, seul admis par le moteur : ces déplacements sont purement internes et n'intéressent pas, en principe, l'aérodynamique de la cellule. En réalité, des portes d'admission supplémentaire sont ouvertes au décollage et des portes de décharge permettent, en cas de panne, d'évacuer l'air capté mais refusé par le compresseur à l'arrêt. Des essais en soufflerie permettent de vérifier que ces divers dispositifs sont compatibles entre eux et ne perturbent pas trop l'écoulement sur l'avion. En ce qui concerne les sorties des moteurs, les sections d'éjection voient leur diamètre varier fortement, par le jeu de pétales ouverts par des vérins : ces sections peuvent passer du simple au double entre le vol subsonique et Mach 2. Là encore, au moyen de très importants essais en soufflerie, il faut obtenir que la confluence judicieusement organisée des écoulements interne (moteur) et externe (cellule) produise la meilleure poussée globale. Il faut aussi vérifier que les variations des formes extérieures de l'éjecteur respectent assez la « loi des aires » pour ne pas entraîner notamment de troubles transsoniques.

Sur les projets des futurs avions hypersoniques, l'intégration à la cellule de moteurs de très grandes dimensions pose des problèmes encore plus ardus. La figure I-45 a représente la photographie d'un engin propulsé par statoréacteur étudié à l'O.N.E.R.A. ; la strioscopie de la figure I-44 b montre qu'à l'incidence 5° du vol à Mach 7 l'onde de choc du nez de l'avion est très voisine de l'entrée d'air du moteur suspendu ; elle y pénétrerait aux incidences supérieures, perturbant très profondément les performances du moteur.

5.7. Le problème du bruit, le bang sonique. — Sans parler du bruit au décollage et à l'atterrissage, lequel provient entièrement des moteurs, un bruit aérodynamique est lié au vol supersonique. Il s'agit de la propagation jusqu'au sol des ondes de choc qui accompagnent l'avion. L'analyse théorique de cette propagation, liée surtout aux propriétés thermiques de l'atmosphère, et l'étude en soufflerie du champ de pression, engendré par l'avion, ont permis de dégager des procédures de vol

minimisant le bang ressenti au sol; le dessin de l'avion lui-même laisse, semble-t-il, peu d'espoir de réduire l'intensité de ce phénomène inévitable, lié en première approximation au poids de l'avion, pour une vitesse donnée.

Notons qu'un avion peut voler à une vitesse faiblement supersonique ($M \approx 1{,}15$) dans la stratosphère, sans que ses ondes de choc n'atteignent le sol, où la température et donc la vitesse du son sont plus grandes; cette propriété est mise à profit pour les procédures d'accélération et de décélération supersoniques des avions de transport conçus pour des vitesses supérieures à celle du son.

5.8. La stabilité. — L'étude des manœuvres et de la stabilité de l'avion est l'objet de la mécanique du vol. Cette étude s'appuie sur la connaissance des forces et moments qui agissent sur l'avion; traînée et portance en fonction de l'incidence, force latérale en fonction du dérapage, ainsi que moments de tangage, de giration (ou de « lacet ») et de roulis, sont l'objet le plus courant des essais en soufflerie. Les équations de la mécanique du vol comportent en outre des termes d'amortissement, liés aux vitesses de déplacements: tel est, par exemple, l'amortissement [1] de tangage, lié à la vitesse de tangage, ou vitesse de variation de l'incidence. Des essais en soufflerie sont spécialement consacrés à ces mesures dites instationnaires (V. § 7.6.4).

Les équations de la mécanique du vol et le pilotage de l'avion sont simplifiés lorsque les forces et moments varient linéairement avec les angles d'incidence ou de dérapage. Un rôle essentiel des essais en soufflerie est justement de déceler en temps utile, pour les corriger éventuellement, les écarts ou anomalies présentés par les projets d'avions ou de missiles par rapport à ce comportement linéaire.

Un exemple bien connu est le décrochage, qui met fin au comportement normal de la portance en fonction de l'incidence, et qui est souvent accompagné de perturbations du moment de tangage et même d'engagement dans des vrilles. Dans certains cas catastrophiques, et notamment sur certains des premiers avions de transport subsoniques à ailes en flèche, le décrochage s'accompagnait d'un moment cabreur qui venait encore augmenter l'incidence et aggraver le phénomène. Ce phénomène, appelé super-décrochage, est aujourd'hui systématiquement recherché sur tout nouveau projet.

Mais c'est dans le domaine transsonique que se sont rencontrées les plus graves anomalies, le plus souvent liées à des décollements plus ou moins étendus de la couche limite sous l'effet des ondes de choc. Découvertes en premier aux États-Unis d'Amérique, ces anomalies ont conservé chez les techniciens leurs noms anglo-saxons.

Se produisant en bouts d'ailes, ces décollements provoquent d'abord un tremblement, très sensible au pilotage; dans certains cas, une demi-aile seulement est affectée et s'enfonce en un violent mouvement de roulis, c'est le « wing-dropping ». Affectant les deux ailes simultanément sur leur partie arrière, les décollements transsoniques entraînent un moment cabreur qui conduit à un engagement rapide en ressource, ou « pitch-up ». Les importants facteurs de charge qui accompagnent cet accident peuvent détruire l'avion ou seulement affecter passagèrement la physiologie du pilote (voile noir, etc.) et les possibilités de pilotage.

La stabilité de route. — La stabilité de route d'un avion est très difficile à prévoir par le calcul. La contribution de la dérive elle-même peut être évaluée, mais celle de l'avion complet doit être obtenue par des essais en soufflerie. Dans certains montages, l'avion, tenu par son centre de gravité, est libre de pivoter, comme une girouette sur son axe, et l'on vérifie ainsi sa stabilité dans toutes les configurations.

La stabilité de route présente des caractères particulièrement critiques dans trois domaines de vol:

— Dans les conditions d'atterrissage ou de décollage, où les fortes incidences rencontrées, notamment sur les avions en delta, conduisent aile et fuselage à « masquer » la dérive et à réduire son efficacité. Cette circonstance explique la grande dimension des dérives sur les avions en delta.

— Dans le domaine transsonique où, selon la distribution des sections transversales, des décollements transsoniques momentanément présents sur la partie arrière du fuselage, où les sections sont décroissantes, peuvent réduire l'efficacité des surfaces de dérives voisines, et parfois annuler la stabilité de route.

— Dans le domaine supersonique aussi, l'efficacité de la dérive décroît à Mach croissant, en raison de la réduction de son gradient de force latérale annoncée par la théorie linéarisée:

$$\frac{dC_y}{d\beta} = \frac{4}{(M^2 - 1)^{1/2}}\ ;\ (d\beta \text{ en radians})$$

La mise en incidence de l'avion, qui fait baigner la dérive dans l'écoulement détendu à l'extrados de l'aile vient doublement aggraver cet effet: l'augmentation du Mach local réduit le coefficient de force normale puisque le Mach local est supérieur au Mach de vol, et la pression cinétique de l'écoulement détendu est inférieure à la pression cinétique normale du vol.

Cette réduction de la stabilité de route sur les avions en manœuvre supersonique est, en fait, dimensionnante pour les dérives; ces effets sont tels qu'il faut parfois, pour conserver une stabilité suffisante, disposer de quilles qui, situées sous la partie arrière du fuselage, bénéficient au contraire des effets de recompression locale liés à la mise en incidence.

Sur les avions multimoteurs, la panne d'un moteur et la dissymétrie résultante du vecteur poussée entraînent un moment qui tend à mettre l'avion en dérapage; en général, la dérive, dimensionnée pour les considérations exposées plus haut, suffit à contrôler ce moment par un braquage très modéré de sa gouverne; sur certains avions tels que « Concorde », ce braquage est même commandé automatiquement par la panne d'un réacteur.

Par leur caractère parfois subit, violent et souvent instationnaire, ces phénomènes mettent la structure de l'avion à l'épreuve; l'un des objets des essais en vol est leur recherche systématique, en vue de bien délimiter l'enveloppe de vol de l'avion, c'est-à-dire le domaine des altitudes, vitesses et attitudes dont, impérativement, il ne doit pas s'écarter. Les meilleures solutions retenues sont naturellement celles qui permettent de transgresser cette enveloppe de vol sans danger immédiat.

5.9. L'aéroélasticité. — Même en l'absence de toute anomalie caractérisée, la combinaison d'une vitesse et d'une masse volumique de l'air excessive — vol trop rapide et trop bas — peut conduire l'aile ou un autre organe élastique de l'avion à vibrer, à flotter comme un drapeau dans le vent. Les études ont montré qu'il s'agissait d'un couplage entre les déformations de la surface et les forces aérodynamiques instationnaires liées à ces déformations; le phénomène peut, dans certains cas, conduire à la désintégration de l'avion en quelques centièmes de seconde.

Extrêmement complexes sur le plan théorique, les études d'aéroélasticité sont cependant menées à bien, grâce à des méthodes expérimentales éprouvées, basées sur des mesures de vibrations effectuées au sol. Modes de vibrations et fréquences propres mis ainsi en évidence guident l'évaluation de la pression cinétique pour laquelle le phénomène peut apparaître en vol, et par conséquent déterminent la limite altitude-vitesse à ne pas transgresser. Ces problèmes ont un plus grand degré de sévérité sur les avions géants dont le devis de poids exige des structures légères et par suite extrêmement souples, ainsi qu'en témoigne

[1] On sait que l'amortissement désigne la réduction plus ou moins rapide des oscillations successives d'un système écarté de son équilibre; par exemple, les variations d'incidence d'un avion. Si l'amplitude des oscillations successives augmente au lieu de diminuer, l'appareil est dynamiquement instable.



Fig. I-46 a — Lockheed C5A « Galaxy » en vol (*Air et Cosmos*)

la déformation de l'aile du Lockheed C 5 A « Galaxy », photographié en vol normal, puis au sol (fig. I-46 a et b).

5.10. L'avion de transport supersonique. — Les problèmes soulevés par le vol aux vitesses transsoniques et supersoniques ont été étudiés et en grande partie résolus par les recherches dans les souffleries (V. § 7.4) et grâce à l'expérience acquise dans l'utilisation des avions supersoniques militaires. C'est ainsi qu'a été rendu possible la conception, puis la construction, des avions de transport supersoniques où sont incorporées toutes les règles telles que la loi des aires, l'adaptation des ailes en présence du fuselage, l'utilisation avantageuse de la portance tourbillonnaire, etc., de sorte que le vol aux vitesses subsoniques soit économiquement possible, et que le passage transsonique ne présente plus d'anomalies. L'application optimale des règles de l'aérodynamique n'a, à son tour, été possible que grâce aux progrès parallèles de la technique des moteurs, des méthodes de construction et de la métallurgie des alliages légers. Aux États-Unis d'Amérique, le choix d'un autre métal et d'une vitesse plus grande (titane à Mach 3) ont entraîné de nombreuses difficultés.

Les valeurs numériques ci-dessous sont typiques d'un avion de transport supersonique volant à Mach 2 à l'altitude de 17 km : C_z de vol voisin de 0,12 ; C_x de vol voisin de 0,0158 ; la finesse maximale est alors voisine de 7,6. Dans le coefficient C_x, la résistance de portance entre pour 50 % environ, la résistance d'onde pour 22 %, et la résistance de frottement pour 28 %.

5.11. Problèmes aérodynamiques des hélicoptères. — Lors du vol en translation, les pales d'un hélicoptère obéissent à une variation cyclique de leur calage, destinée à annuler l'effet de leur vitesse différente

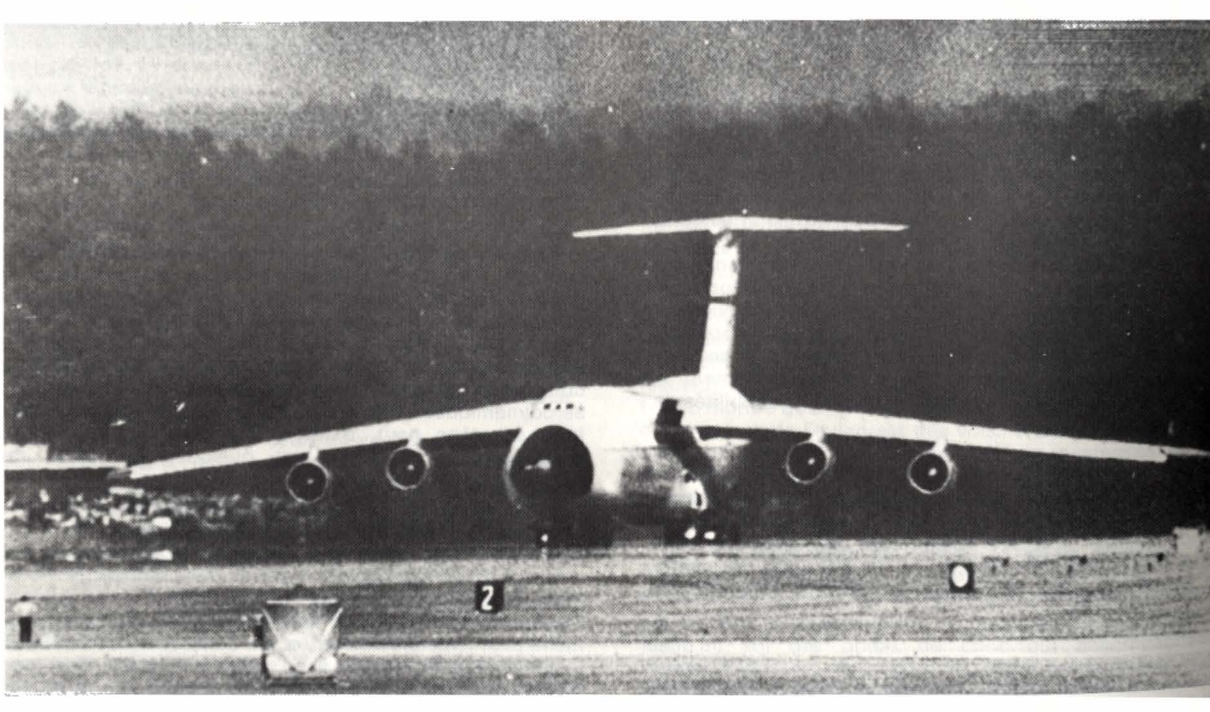


Fig. I-46 b — Lockheed C5A « Galaxy » au sol (*Air et Cosmos*)

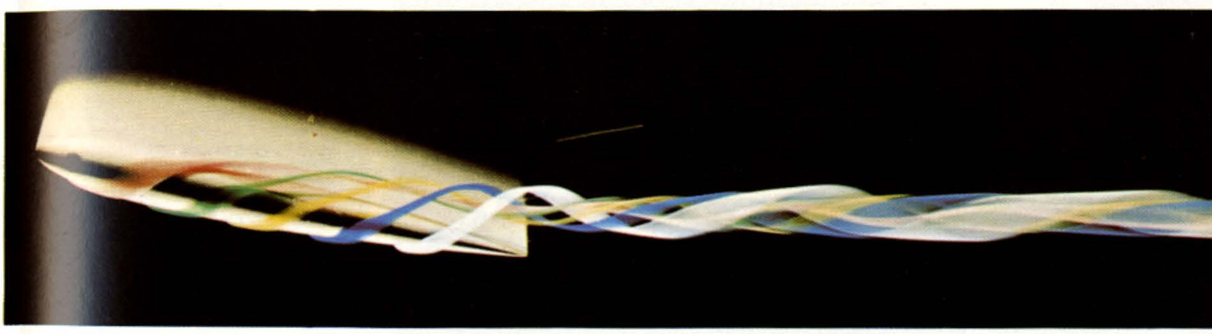
Aérodynamique

Visualisations d'écoulements au tunnel hydrodynamique

L'émission de filets colorés au sein d'un écoulement à faible vitesse (10 à 20 cm/s) ou à la paroi d'une maquette plongée dans cet écoulement, permet de visualiser les filets fluides, les tourbillons, les sillages, etc. Les trois exemples ci-dessous sont relatifs à des configurations tourbillonnaires particulières.



Allée de tourbillons en aval d'une plaque plane à incidence nulle. La structure instationnaire de l'écoulement est engendrée par le détachement périodique de tourbillons alternés (tourbillons de Karman). Ce phénomène se produit à très faibles nombres de Reynolds.



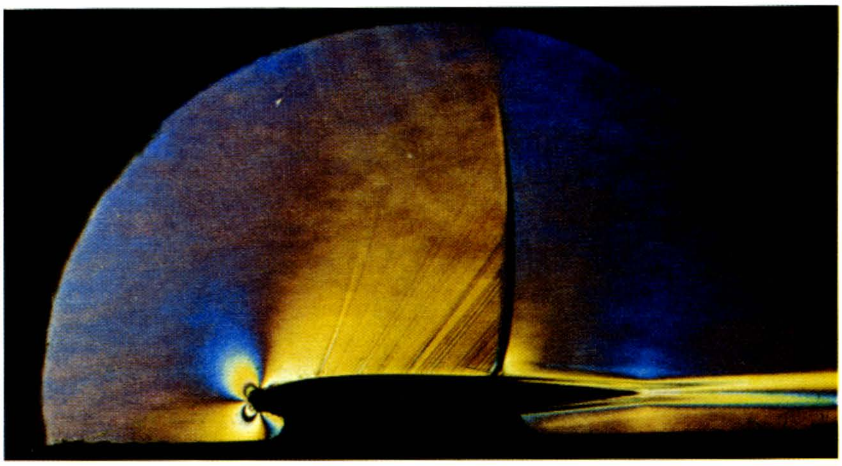
Tourbillon marginal sur une aile d'envergure limitée, incidence 12°. L'enroulement de la nappe tourbillonnaire qui prend naissance à l'extrémité marginale de l'aile (allongement 4) est remarquablement mis en évidence par des filets colorés émis à l'intrados : $\mathcal{R}_l$ = 12 000, corde de l'aile l = 60 mm.



Tourbillons sur une maquette d'avion type Concorde, incidence 12°. On distingue le noyau des tourbillons d'ogive du fuselage et des tourbillons d'apex de l'aile. Le jet des réacteurs est simulé. $\mathcal{R}_l$ = 25 000, corde moyenne de l'aile l = 225 mm. On notera la symétrie quasi parfaite de l'écoulement.

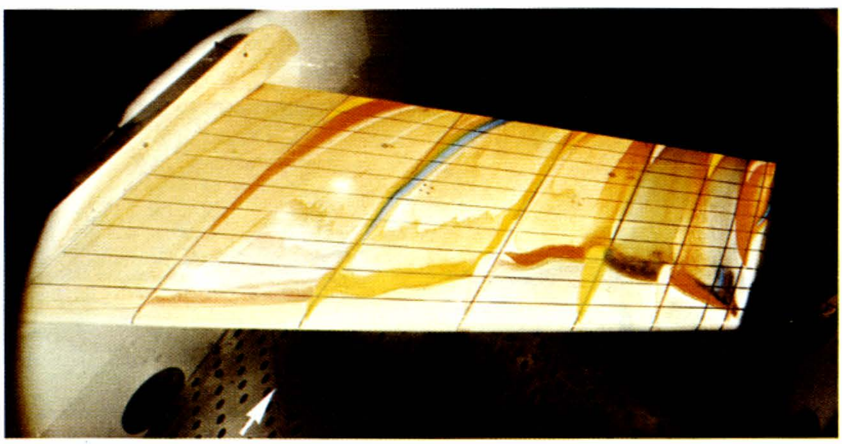
Photos : O.N.E.R.A.

Visualisations d'écoulements en soufflerie



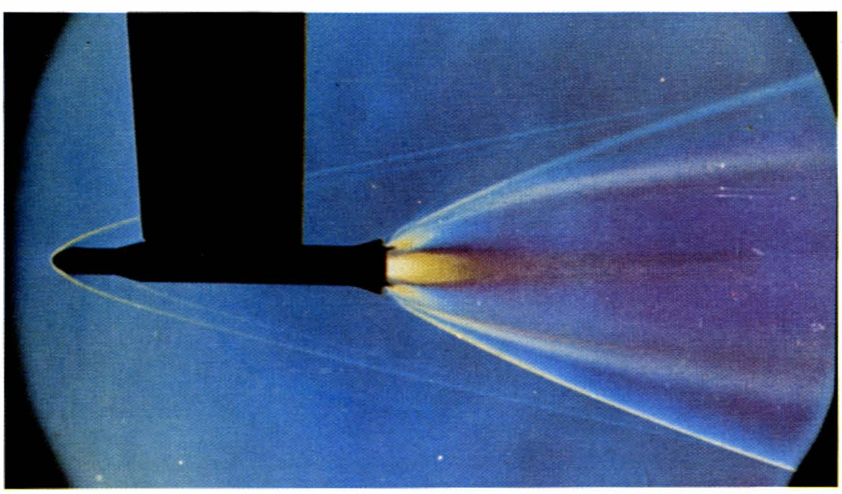
L'onde de choc limite le domaine localement supersonique qui se développe autour du profil en arrière du bord d'attaque. On distingue nettement les couches limites et le sillage.
Corde du profil $l = 0,08$ m.
Nombre de Reynolds $\mathcal{R}_l = 5,3.10^6$.

Écoulement transsonique bidimensionnel autour d'un profil d'aile à incidence nulle, nombre de Mach = 0,88, couche limite turbulente : strioscopie interférentielle.



Des liquides très fluides de différentes couleurs sont injectés à la paroi de l'aile. L'onde de choc qui se forme peu en arrière du bord d'attaque est visualisée par le petit décollement qu'elle provoque à son pied.
Corde moyenne de l'aile : $l = 0,63$ m
$\mathcal{R}_l = 2,5.10^6$.

Écoulement transsonique tridimensionnel sur une aile en flèche, à incidence 4,5°, nombre de Mach = 0,84 : visualisations pariétales.



L'onde de choc de tête est visible ainsi que les phénomènes complexes qui prennent naissance au culot. L'essai en soufflerie simule le nombre de Mach en un point de la trajectoire et l'altitude correspondante.

Écoulement hypersonique de révolution autour d'un missile avec simulation du jet propulsif, nombre de Mach = 6 : strioscopie.

Photos : O.N.E.R.A.

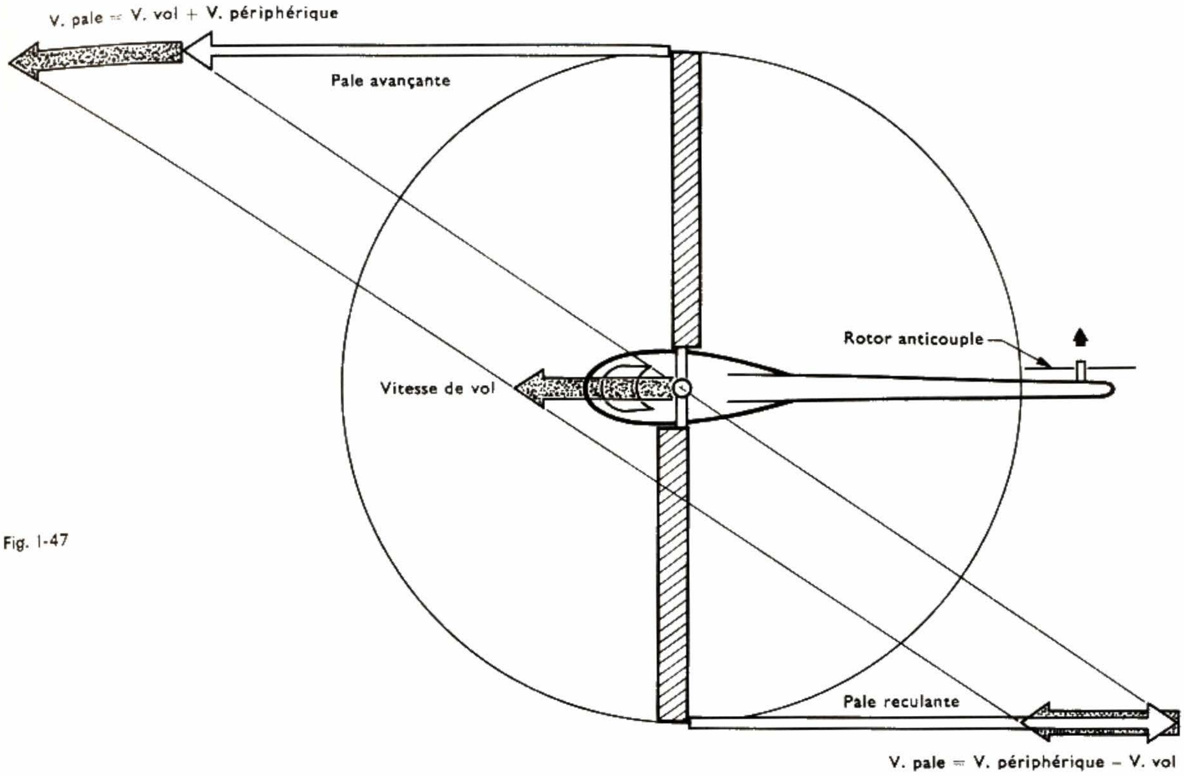


Fig. I-47

selon que la pale avance (grande vitesse) ou recule (faible vitesse) (fig. I-47).

C'est ainsi que l'incidence de la pale avançante est diminuée, et celle de la pale reculante augmentée, pour que la force de portance ($C_z . V^2$) demeure constante afin de ne pas déséquilibrer le rotor. La recherche de grandes vitesses de translation — on réalise couramment des vitesses supérieures à 300 km/h — conduit ainsi à faire pénétrer la pale avançante dans le domaine transsonique, tandis que la pale reculante s'approche de sa portance maximale. Des profils spéciaux sont étudiés, pour présenter à la fois des qualités de portance maximale et d'écoulement transsonique acceptables ; un expédient souvent employé est de munir l'hélicoptère de petites ailes classiques, capables, aux vitesses élevées, de décharger notablement le rotor du poids de l'appareil. La figure I-48 représente l'hélicoptère américain « Huey Cobra » ainsi muni d'une aile et d'un empennage ; cette disposition,

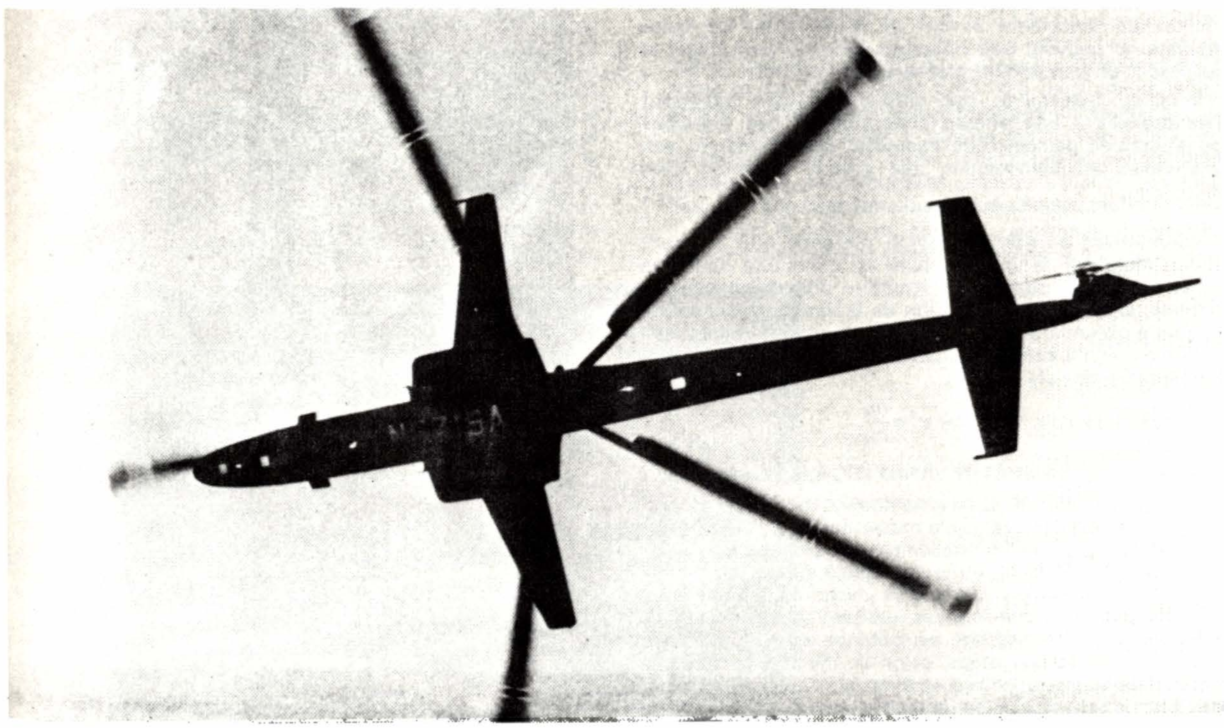


Fig. I-48 — Hélicoptère « Huey Cobra » (*Aviation Week*)

jointe à un fuselage très effilé destiné à réduire sa section frontale, lui confère une maniabilité accrue à grande vitesse (300 km/h).

Le fait que les pales d'un hélicoptère en translation rapide fonctionnent en permanence dans des conditions aérodynamiques variables donne une grande importance tant aux études d'aérodynamique instationnaire qu'à celles des couplages entre les forces aérodynamiques variables et les caractéristiques structurales des pales pour éviter les flottements aéroélastiques.

6. LES MISSILES

6.1. Généralités. — Bien que dénuées d'ailes de dimensions appréciables, les fusées, qui constituent aujourd'hui une classe importante de véhicules aériens, posent cependant de nombreux et sérieux problèmes d'aérodynamique, tant lors de leur lancement que lors de la rentrée dans l'atmosphère de leurs ogives scientifiques ou militaires, inertes ou habitées.

Les principales catégories de difficultés qui ont dû être résolues, lors du développement de grandes fusées balistiques, qu'elles soient scientifiques ou militaires, sont les suivantes :

— stabilité et intégrité des différents étages au cours du lancement ;

— problèmes liés à la présence des puissants jets propulsifs et à leur interaction avec l'écoulement aérodynamique extérieur, notamment les problèmes de « retours de flamme » en transsonique, de la séparation des étages et de l'éclatement des jets à haute altitude ;

— problèmes de la rentrée dans l'atmosphère des ogives militaires, ou des capsules habitées.

La portée maximale d'une fusée balistique est donnée par la formule suivante, issue de la mécanique newtonienne :

$$R = r_0\left[\pi - 4 \text{ arc tg} \sqrt{1 - \overline{V}^2}\,\right]$$

où R est la portée en kilomètres, r_0 le rayon de la terre en kilomètres, et $\overline{V}$ la vitesse finale de lancement réduite, c'est-à-dire divisée par la vitesse de satellisation :

$$\overline{V} = \frac{\text{vitesse en mètres par seconde}}{7\,915}$$

C'est ainsi que pour une portée de 3 000 km il faut réaliser un lancement à plus de 4 800 m/s. De telles vitesses ne peuvent être obtenues avec un seul étage, et les fusées en comportent toujours deux ou trois.

Lors du lancement, ces différents étages traversent l'atmosphère à une vitesse croissante, et des pressions considérables peuvent être exercées. Elles confèrent aux problèmes aérodynamiques une grande sévérité : c'est ainsi que la pression cinétique de référence $\left(q = \frac{1}{2}\rho_0 V_0^2\right)$ correspondant au vol d'un avion n'excède que rarement 1 bar, alors que la valeur 4 bars est commune pour une fusée militaire à poudre. La structure doit donc être très robuste, alors que l'optimisation de la vitesse finale est au contraire obtenue pour la masse de structure la plus faible possible par rapport à la masse de carburant, ainsi que l'indique la formule simple :

$$\Delta\vec{V} = \vec{v} \ln \frac{m_i}{m_f}$$

qui relie l'accroissement de vitesse $\Delta\vec{V}$, à la vitesse d'éjection $\vec{v}$ du jet propulsif, et au logarithme népérien du rapport de la masse initiale m_i et de la masse finale m_f. Chacun des étages de la fusée doit naturellement être stable, c'est-à-dire que la fusée doit rester toujours alignée sur sa trajectoire ; la mise par le travers entraîne la destruction immédiate. Sur les petites fusées sondes utilisées pour les études scientifiques, cette stabilité est obtenue à l'aide d'ailettes disposées sur chaque étage, selon de délicats étagements pour éviter les interactions d'un étage sur l'autre. L'efficacité des ailettes est calculée par la théorie des corps élancés qui tient compte notamment de l'importante interaction favorable due à la présence du corps de la fusée (fig. I-49).

Sur les grandes fusées civiles et militaires, la stabilité n'est plus demandée à des surfaces aérodynamiques, mais au contrôle de la direction des jets propulsifs dont les tuyères sont pivotantes et commandées par des centrales de guidage.

6.2. Problèmes liés aux jets propulsifs. — Dans le cas le plus fréquent des tuyères groupées au culot, en grappes de quatre, il se crée au moment de la traversée transsonique et dans tout le domaine supersonique ultérieur un phénomène de retour des gaz chauds vers la zone centrale, entre les tuyères. Découvert à la suite d'accidents en vol, ce phénomène, lié aux fortes dépressions présentes dans cette zone par l'effet même des jets, est aujourd'hui bien compris et le culot des fusées est toujours protégé par des revêtements isolants. Une excellente solution est d'occuper cette partie centrale critique par une cinquième tuyère (Saturn) ou par une septième (certaines fusées soviétiques).

La séparation du premier étage brûlé pose encore un problème de stabilité : si l'on attend, pour allumer l'étage suivant, que le nez de ce premier étage consumé soit assez éloigné, le second étage aérodynamiquement instable peut s'engager par le travers et faire avorter la mission. Si au contraire l'allumage est trop précoce, le jet éclatant sur le nez trop proche perturbe gravement l'écoulement. Des essais préalables en soufflerie permettent de rechercher les configurations critiques et aident à définir les séquences de mise à feu convenables pour résoudre ces difficultés.

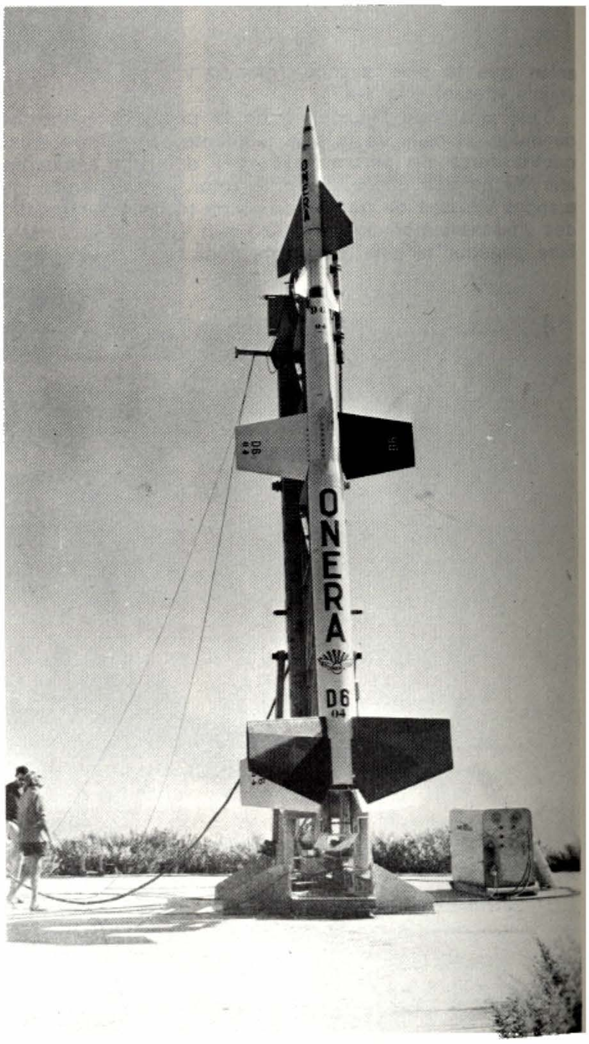


Fig. I-49 — Fusée expérimentale à trois étages (*O.N.E.R.A.*)

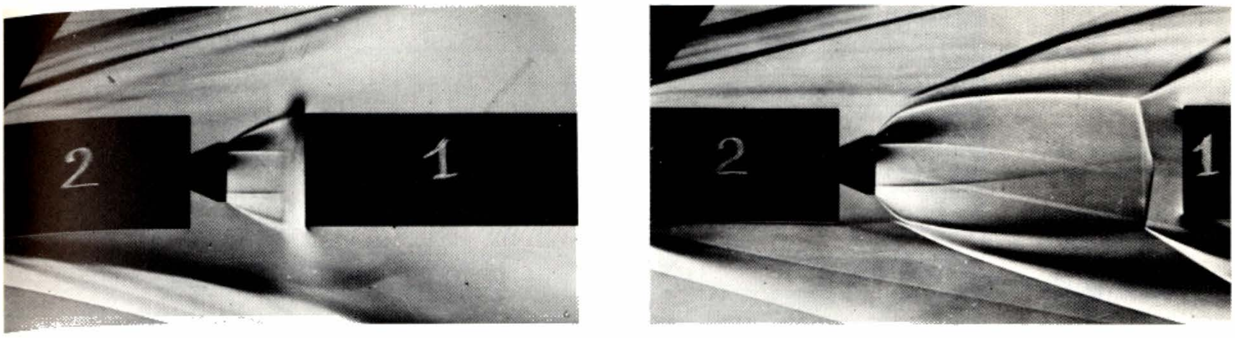


Fig. I-50 — Séparation des étages d'une fusée à Mach 6 (*O.N.E.R.A.*)

Les strioscopies de la figure I-50, réalisées à Mach 6 dans une soufflerie hypersonique de l'O.N.E.R.A., sont relatives aux deux cas extrêmes : à gauche, le jet de l'*étage* 2 éclate sur le nez de l'étage 1 et, s'évasant, provoque un décollement complet de l'écoulement aérodynamique (V. § 2.8) ; à droite, l'écoulement est correct sur l'étage 2, mais il a fallu attendre un écartement suffisant. Visualisations et mesures des efforts aérodynamiques pendant la période critique du recollement, en présence d'efforts transversaux importants, concourent à définir les bonnes séquences de séparation.

Lorsque les derniers étages terminent leur ascension, le jet propulsif s'épanouit considérablement car l'atmosphère est de moins en moins dense ; à une certaine altitude, supérieure en général à 25 ou 30 km, son épanouissement est tel que l'écoulement aérodynamique sur la fusée peut être décollé sur une grande longueur. Ainsi, lors de la fin de combustion du premier étage de « Saturn V », qui intervient à 60 km d'altitude, la totalité de cet étage, soit une longueur de plus de 30 m, est baignée dans un écoulement décollé. Cependant, les pressions correspondantes sont très faibles et les forces et échauffements imposés à la structure restent très tolérables. Différent est le cas des fusées militaires d'interception, ou missiles antimissiles, où la conjonction de jets à très haute pression et d'accélérations très grandes à faible altitude met ce problème d'interaction au premier rang des difficultés.

6.3. La rentrée. — Le retour des ogives de fusées doit obéir à de nombreux impératifs, que l'on ne peut qu'évoquer ici, mais qui sont tous régis par des phénomènes aérothermodynamiques. Une première exigence est un bon repointage pour obtenir une dispersion réduite. Les ogives subissent à cet effet des essais en soufflerie dans tout leur domaine de Mach pour s'assurer de leur stabilité, pour confirmer les prévisions théoriques. La strioscopie de la figure I-51 montre une ogive émoussée, essayée à 10° d'incidence dans la soufflerie hypersonique Mach 10 de l'O.N.E.R.A. Les points calculés avant l'essai prédisent très bien la forme observée de l'onde de choc. La mise en œuvre des puissants moyens de calcul modernes permet de réduire le nombre de mesures en soufflerie, et à les concentrer sur des formes déjà bien définies par les calculs. L'échauffement considérable qui accompagne la rentrée de ces ogives, exige qu'elles soient revêtues de protections consommables, dites « à ablation » issues de travaux de physico-chimie considérables. Les épaisseurs locales de ces revêtements dépendent naturellement des échauffements locaux attendus (maximum au nez, minimum au culot), lesquels doivent donc être prévus au mieux. Les pressions au nez peuvent atteindre 40 bars et les flux des milliers de kilowatts par mètre carré. Ces conditions sévères ne peuvent être réalisées simultanément dans les souffleries même spéciales (V. § 7.4) et c'est à des essais en vol qu'on demande alors la confirmation des calculs.

6.4. Les sillages, le black-out. — L'enthalpie de l'air au point d'arrêt h_i sur un projectile balistique ou sur un satellite rentrant à la vitesse V_0 dans l'atmosphère est donnée par l'équation de la conservation de l'énergie :

$$h_i = h_0 + \frac{1}{2} V_0^2$$

Aux vitesses de plusieurs kilomètres par seconde interviennent, dans l'air que traverse l'onde de choc du véhicule, des phénomènes physico-chimiques, de vibrations moléculaires, de dissociations de molécules d'azote et d'oxygène en atomes et d'ionisation de ces molécules et atomes.

La présence dans l'air ainsi ionisé de nombreux électrons libres constitue ce que les astro-physiciens appellent, depuis Langmuir (1926), un « plasma ». Présent autour du corps et sur de grandes distances dans son sillage, ce plasma a deux effets radioélectriques principaux :

— autour du corps il affecte les transmissions radioélectriques, par une atténuation fonction de sa densité électronique ; cela peut aller jusqu'au « black-out » temporaire, marque bien connue de toutes les rentrées spatiales ;

— dans le sillage du corps, ce plasma a des propriétés d'écho-radar qui en permettent la détection. Il suffit d'évo-

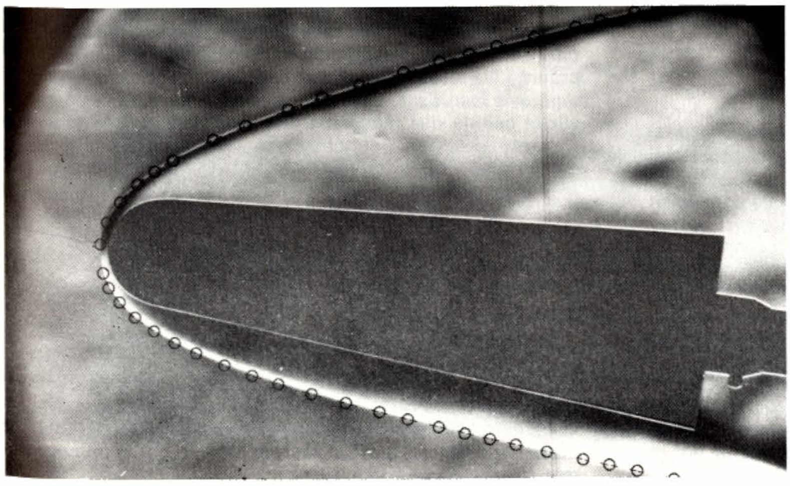
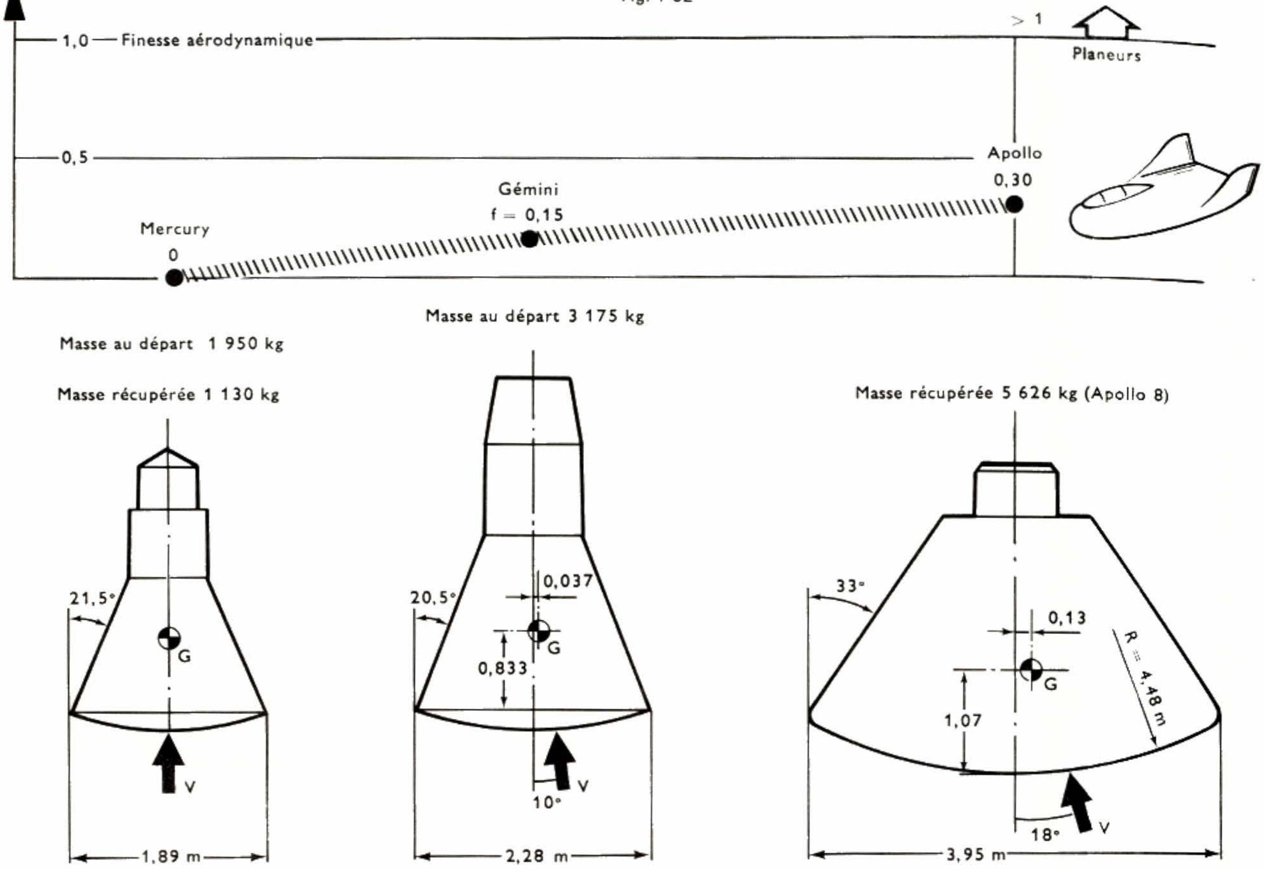


Fig. I-51

Strioscopie à Mach 10 (*O.N.E.R.A.*)

Fig. I-52



quer ici l'intérêt militaire de cette détection, et de signaler que ce phénomène est à la base de la technique dite des « leurres », où l'ogive balistique assaillante s'entoure de pseudo-ogives dotées de sillages volontairement altérés pour saturer les moyens de détection de l'assailli. La forme, émoussée ou pointue, des ogives joue un rôle considérable dans la formation du sillage ionisé.

6.5. La rentrée portante, le plané hypersonique. — Si la propriété de pénétrer dans l'atmosphère par une trajectoire balistique non déviée est recherchée pour les ogives militaires, elle pose au contraire des problèmes de récupération pour les satellites habités. La possibilité de choisir, dans une certaine mesure, son aire d'atterrissage par une manœuvre dans l'atmosphère a été recherchée très tôt. La figure I-52 montre que, dès les expériences « Gemini », on obtenait la création d'une force aérodynamique transversale par un léger déport du centre de gravité. Cette méthode a été développée encore sur des véhicules « Apollo », au point qu'ils sont même capables de maintenir plusieurs minutes une altitude constante de 45 km avant de redescendre, et de choisir leur zone d'amérissage à quelques kilomètres près. Cependant, la finesse aérodynamique d'« Apollo » reste de 0,3 au maximum alors que le choix de zones terrestres exige des finesses excédant 1 en hypersonique, et 3 ou 4 en subsonique (atterrissage final) (fig. I-53 et I-54). Il ne s'agit pas d'avions, mais de formes démunies d'ailes, très ramassées et arrondies pour résister aux échauffements de la rentrée.

Leurs qualités de vol en hypersonique ont été prévues théoriquement par de puissantes méthodes de calcul numérique appliquant la théorie de Newton (V. § 3.6) à leur géométrie complexe. Ces qualités, confirmées dans les souffleries hypersoniques, ont été éprouvées par des récupérations de maquettes non habitées. Le très difficile pilotage de ces planeurs aux faibles vitesses d'atterrissage (environ 400 km/h) est étudié au moyen de maquettes volantes pilotées telles que celle représentée sur la figure I-53 a et b.

6.6. La navette spatiale. — Ces études constituent la base de départ pour le développement des grandes navettes spatiales qui, à partir de 1980, feront le va-et-vient nécessaire entre la terre et les laboratoires spatiaux. En vue de regagner en planant leur territoire d'origine, elles seront capables de s'écarter de 2 000 km du plan de leur orbite, grâce à une finesse aérodynamique voisine de 1,4 en hypersonique et de 7 en subsonique.

Ces navettes spatiales, contrairement aux vaisseaux spatiaux des années 1960 et 1970, devront être économiques et donc servir plusieurs fois. Cette exigence supplémentaire d'économie, commune à toute nouvelle technique parvenant à maturité, a suscité à son tour un renouveau des études d'échauffement et des nouveaux moyens de protection, métalliques ou à ablation, capables de missions successives à intervalles de deux semaines, après avoir été refourbis. Cette nouvelle classe de véhicules, aptes à des missions complexes, pose tous les problèmes aérodynamiques des avions et ceux des fusées ; parmi ces problèmes, citons celui du passage de la vitesse du son — à l'aller comme au retour — par des cellules plus massives et plus légères à la fois que celles des avions actuels, et l'interaction sur la cellule des puissants jets propulsifs qui sont prévus à haute pression (supérieure à 250 bars). Les moyens d'essais au sol, notamment les souffleries transsoniques, supersoniques et hypersoniques existantes seront utilisés à plein pour engager ces études ; des moyens nouveaux, visant à une meilleure simulation des effets d'échelle (nombre de Reynolds) devront être développés pour les mener à bien.

Conclusion. — S'agissant d'appareils volants, il est naturel d'accorder une très grande importance aux lois de l'aérodynamique, et donc aux formes ; on doit cependant toujours rester conscient de ce qu'il faut en définitive construire l'appareil et que les exigences d'utilisation sont aussi importantes. L'avion réel est ainsi toujours un compromis (fig. I-55).

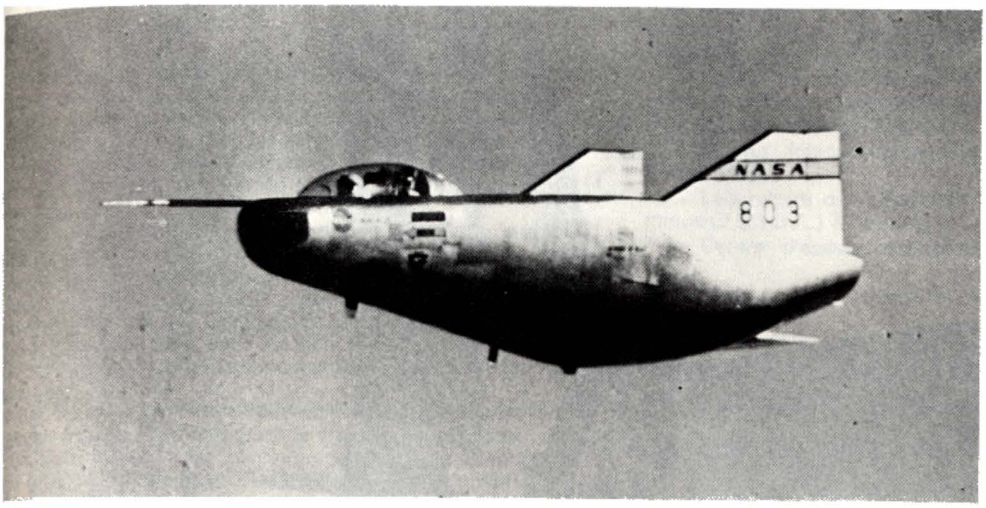


Fig. I-53 a

Véhicule M2F2
en vol planant
(*Air et Cosmos*)

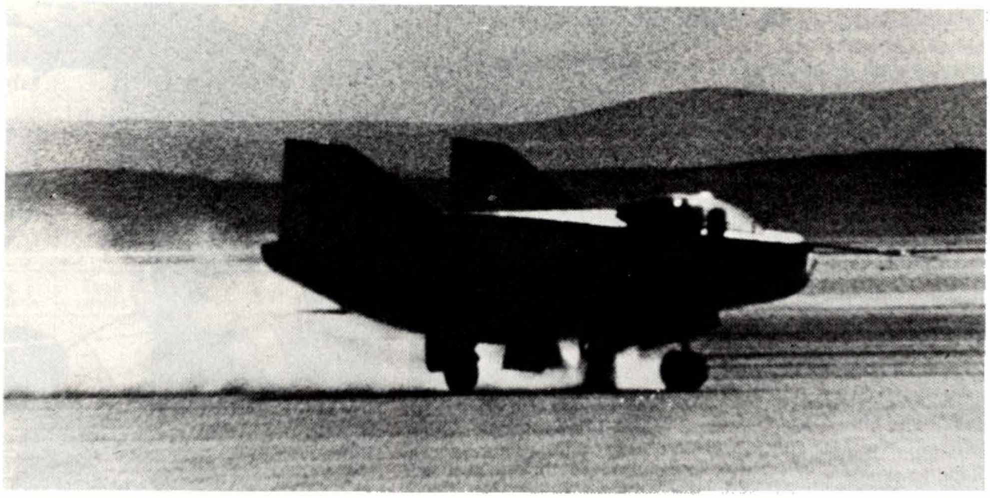


Fig. I-53 b

Véhicule M2F2
à l'atterrissage
(*Air et Cosmos*)

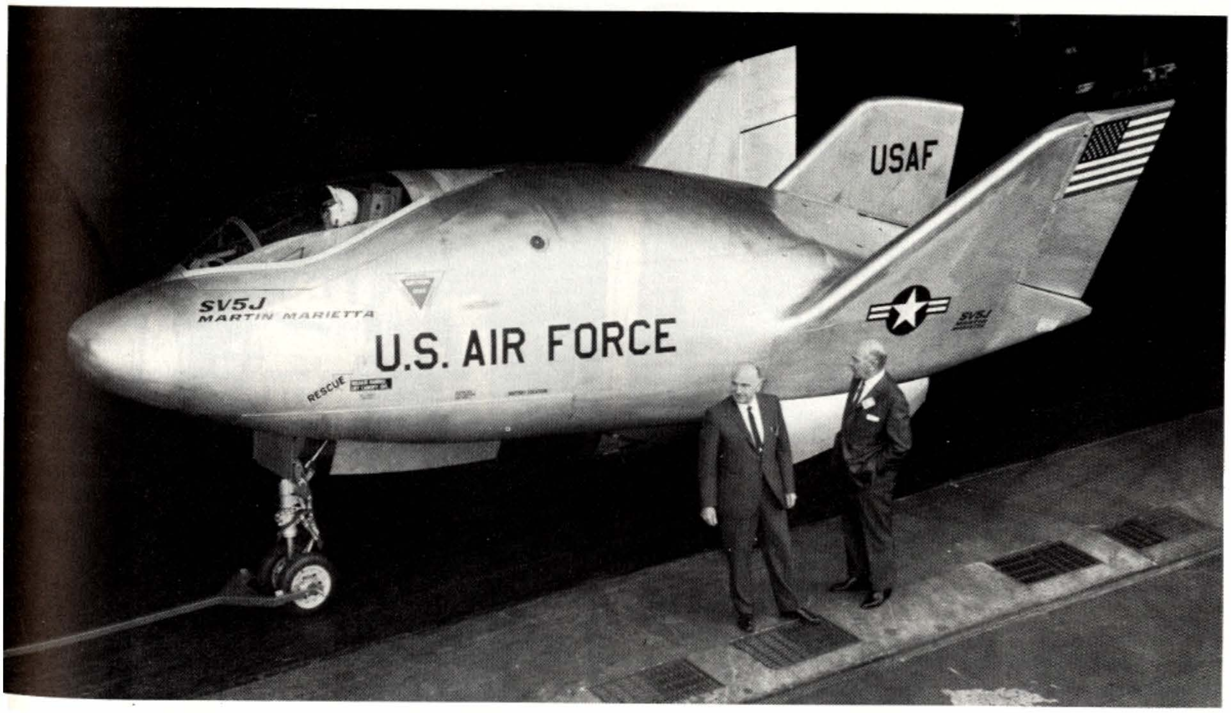


Fig. I-54 — Planeur de recherches subsoniques SV5J (*Martin Marietta*)



Fig. I-55 — Intercepteur biréacteur A 03 « Jaguar » en inspection. Cette photo illustre bien la complexité d'un avion réel *(Air et Cosmos)*

7. LES MOYENS D'ESSAIS ET DE RECHERCHE EN AÉRODYNAMIQUE

7.1. Introduction. — Le but final de toute science est la prévision chiffrée, aussi précise que possible, des phénomènes susceptibles de se produire lorsque l'on place un système physique particulier dans des conditions données.

Pour y parvenir, on s'efforce d'élaborer des théories de plus en plus précises afin de décrire le comportement du système avec le maximum d'exactitude.

À chaque stade de cette recherche, la confrontation entre la prévision théorique et le résultat de l'observation physique est nécessaire pour contrôler la validité des hypothèses sur lesquelles repose la théorie. Elle s'effectue généralement sur des cas imaginés de toutes pièces à cet effet, appelés expériences, pour lesquels il est facile de mesurer les principaux paramètres caractéristiques de l'état du système.

En fait, l'ingénieur aérodynamicien responsable d'un projet trouve rarement dans la théorie les réponses aux questions qu'il se pose, parce que la théorie du phénomène qu'il considère n'est pas connue ou qu'elle est insuffisamment précise ou encore trop difficile à mettre en œuvre. Là aussi, il faut avoir recours à l'expérience pour obtenir les résultats nécessaires.

La mission de l'expérience est donc triple :

— elle inspire les hypothèses et schémas nécessaires au développement des théories ;

— par la confrontation avec les résultats de ces théories, elle confirme ou infirme leur validité et celle des hypothèses émises ;

— elle fournit des données chaque fois que la prévision théorique est déficiente, ce qui arrive assez souvent dans le cas toujours fort complexe des applications pratiques.

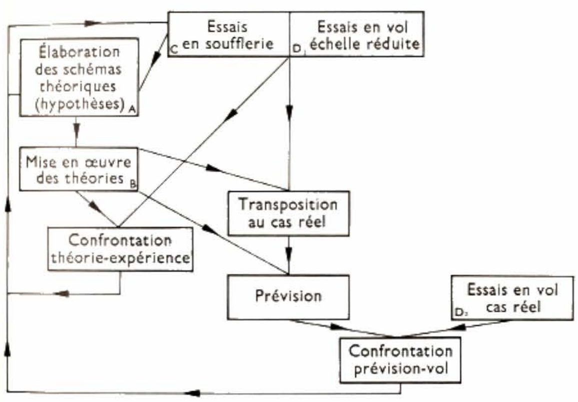


Fig. I-56 — Organigramme

Les divers moyens d'étude et de recherche dont on dispose pour résoudre les différents problèmes de l'aérodynamique vont être présentés suivant le niveau où ils interviennent dans la résolution du problème général posé en préalable (fig. I-56) :

1) Le tunnel hydrodynamique, au stade de l'élaboration des schémas théoriques (A).

2) Les analogies électriques comme moyen de mettre en œuvre certaines théories (B).

3) L'arsenal considérable des souffleries auquel on peut adjoindre quelques moyens d'essais particuliers (C).

4) Les essais en vol au stade de la confrontation ultime entre prévision et expérience (D).

Cette classification met sur le même plan des catégories de moyens d'essais d'importances pratiques très différentes ; il convient d'insister dès maintenant sur le rôle considérable des essais en soufflerie et des essais en vol pour la mise au point des aéronefs.

Ces moyens d'essais sont très répandus dans le monde, notamment dans les pays où l'industrie aéronautique et spatiale est développée. Ils sont mis en œuvre par les grands organismes de recherche aérospatiale, les industriels et les universités.

En particulier, la France dispose d'une gamme complète de moyens d'essais répartis sur l'ensemble du territoire et placés sous la responsabilité de différents organismes :

— Office national d'études et de recherches aérospatiales (O.N.E.R.A.) à Modane, Toulouse, Chalais-Meudon, Fontenay-aux-Roses, Cannes ;

— Institut franco-allemand de recherches de Saint-Louis (I.S.L.)

— Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques (L.R.B.A.) à Vernon ;

— Centre d'essais aéronautiques de Toulouse (C.E.A.T.) ;

— Instituts de mécanique des fluides de Lille, de Marseille et de Toulouse ;

— Universités (Orsay, Poitiers) et C.N.R.S. (Meudon-Bellevue) ;

— Institut aérotechnique de Saint-Cyr ;

— Sociétés aéronautiques (A.M.D.-Bréguet-Aviation, S.N.I.A.S.)

7.2. Le tunnel hydrodynamique. — Les installations de ce type où le fluide d'expérience est l'eau ne permettent de réaliser que des similitudes approximatives (nombre de Mach ≈ 0 ; nombre de Reynolds faible). Elles présentent néanmoins un intérêt considérable par la grande facilité avec laquelle il est possible d'y visualiser les écoulements.

Pour comprendre ce qui se passe dans un écoulement, il est en effet très important de connaître le chemin suivi par les particules élémentaires qui le composent et il n'est pas facile d'y parvenir dans les souffleries.

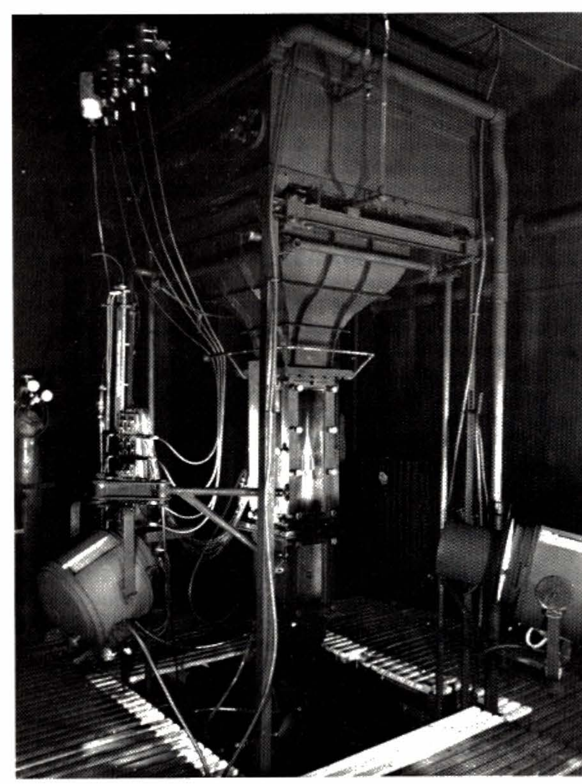


Fig. I-57 — Tunnel hydrodynamique (*O.N.E.R.A.*)

Un tunnel hydrodynamique se compose essentiellement d'un réservoir, d'une canalisation d'évacuation transparente, où l'on place la maquette, et d'une vanne (fig. I-57). Deux procédés de visualisation sont principalement employés.

7.2.1. Les visualisations par bulles d'air. — Les bulles se forment au moment du remplissage de la cuve lorsqu'on ajoute à l'eau une petite quantité de détergent.

On observe l'écoulement en l'éclairant par des faisceaux plans de faible épaisseur.

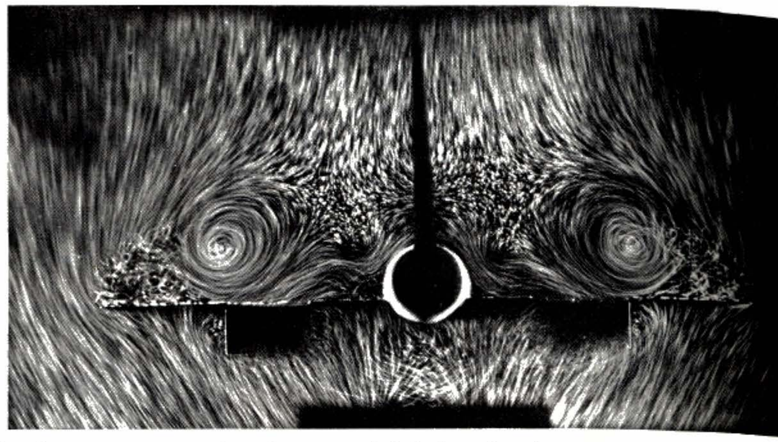


Fig. I-58

Visualisation par bulles d'air au tunnel hydrodynamique (*O.N.E.R.A.*)

La figure I-58 représente une photographie obtenue par cette méthode; c'est une coupe de l'écoulement autour d'une maquette de l'avion Concorde en incidence, par un plan perpendiculaire à la fois au plan de l'aile et au plan de symétrie de la maquette.

Les tourbillons d'extrados, dont l'importance a été signalée au paragraphe 4, sont mis en évidence de façon particulièrement spectaculaire et précise.

7.2.2. Les visualisations par filets opaques éventuellement colorés. — On les obtient en injectant un liquide opaque de même masse volumique que l'eau soit à la paroi des maquettes, soit grâce à des sondes émettrices disposées en amont du champ d'observation.

Les photographies obtenues sont aussi artistiques qu'instructives et ont été abondamment utilisées dans les paragraphes précédents (V. § 4, fig. I-29 et hors-texte).

Des films sont également pris pour suivre les diverses particules visualisées dans leur déplacement, spécialement lorsqu'on étudie des phénomènes instationnaires. Ils facilitent la compréhension du phénomène observé et permettent d'accéder, si nécessaire, à une analyse quantitative du champ des vitesses.

7.3. Les analogies rhéoélectriques et électriques. La méthode des analogies a été beaucoup utilisée dans le passé parce qu'elle était pratiquement le seul moyen de tirer parti d'un certain nombre d'équations fournies par les études théoriques.

De nos jours, grâce aux progrès rapides de l'informatique, l'ingénieur peut effectuer des calculs de plus en plus compliqués avec une très grande précision, mais pour cela il lui faut disposer d'ordinateurs puissants et coûteux et il doit établir des programmes de calculs complexes dont la mise au point peut être longue et délicate; aussi les méthodes analogiques qui ne nécessitent pas de moyens considérables présentent-elles toujours de l'intérêt.

Ces méthodes consistent à utiliser un système physique dont les paramètres sont aisément mesurables et qui est régi par des équations du même type que celles que l'on a à résoudre. La solution numérique de l'équation est alors obtenue en effectuant des mesures dans un certain domaine à la limite duquel on applique les conditions transposées des conditions aux limites du problème initial.

7.3.1. Les analogies rhéoélectriques. — Elles reposent sur l'identification du champ aérodynamique à un milieu conducteur continu. L'équation du potentiel électrique en un point d'un conducteur de conductivité uniforme est en effet l'équation de Laplace:

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

identique à celle que l'on a à résoudre pour les écoulements de fluides parfaits irrotationnels, incompressibles. Les applications suivantes sont les plus couramment utilisées:

1° *Étude des profils d'aile.* — C'est un problème bidimensionnel. L'analogie est effectuée avec un conducteur plan d'épaisseur faible et constante, de conductivité uniforme.

On peut associer le potentiel électrique soit au potentiel des vitesses, soit à la fonction de courant qui sont toutes les deux harmoniques, mais la seconde association, plus simple à réaliser, est plus employée.

Dans ce cas, le contour du profil à étudier, qui est une ligne de courant du champ aérodynamique, doit être une équipotentielle électrique: la maquette du profil est donc fabriquée en matériau conducteur.

On la place au centre d'un bassin rectangulaire de grandes dimensions contenant un électrolyte et alimenté par deux électrodes placées le long de deux côtés opposés (fig. I-59).

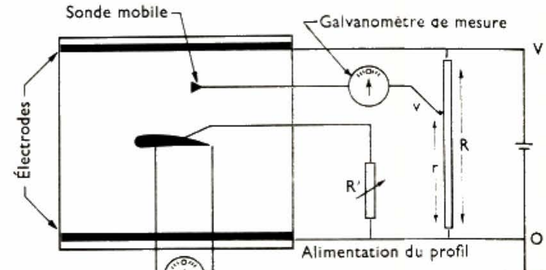


Fig. I-59 — Schéma d'une cuve rhéoélectrique

Puis le potentiel du profil est ajusté de façon à ce que la condition de Joukovski (V. § 3.2) soit assurée; la ligne de courant, qui a longé le profil, quitte alors celui-ci au bord de fuite et le champ des équipotentielles électriques que l'on réalise correspond bien à un champ de lignes de courant physiquement réaliste (fig. I-60).

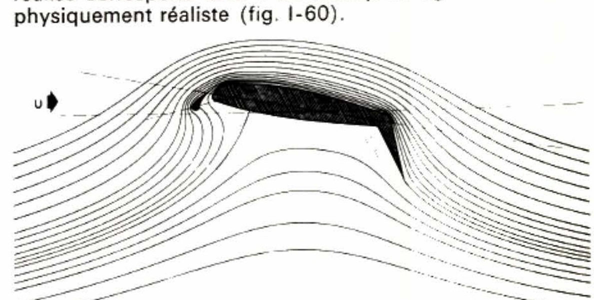


Fig. I-60

Champ de lignes de courant déterminé à la cuve rhéoélectrique

2° *Étude d'écoulements de révolution.* — On procède comme précédemment mais en utilisant des cuves où la hauteur d'électrolyte est variable, cuve à fond incliné ou à fond hyperbolique.

3° *Étude d'écoulements tridimensionnels*

a) *Théorie de la ligne portante.* — La théorie de l'aile d'envergure limitée proposée par Prandtl (V. § 4.1) conduit à une équation intégrodifférentielle pour la répartition

tion de circulation en envergure. Celle-ci peut être résolue aisément par analogie. C'est le principe du calculateur d'ailes proposé en 1946 par L. Malavard.

b) *Théorie linéarisée de la surface portante.* — L'aérodynamique du vol à grande vitesse conduit à l'utilisation de formes d'ailes présentant de fortes flèches. Dans ce cas, la théorie de la ligne portante est insuffisante pour prévoir correctement les performances et il faut recourir à la théorie plus élaborée de la surface portante. Cette théorie linéaire

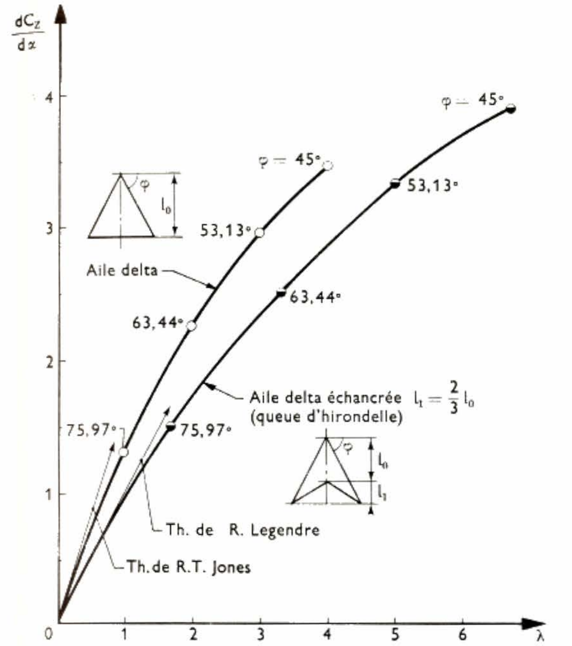


Fig. I-61 — Détermination du gradient de portance d'ailes delta à la cuve rhéoélectrique tridimensionnelle

considère que l'effet de la présence de l'aile dans l'écoulement est la somme d'un effet d'épaisseur et d'un effet portant. Ces deux problèmes peuvent être traités à la cuve électrique tridimensionnelle (V. fig. I-61).

7.3.2. Les analogies électriques. — Un autre type d'analogie doit être utilisé pour résoudre des équations de type hyperbolique comme celles que l'on rencontre avec les écoulements supersoniques. Dans ce cas, on emploie des réseaux d'inductances et de condensateurs. L'évolution du potentiel, en un nœud du réseau en fonction du temps, est en effet assez bien représentée par l'équation :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{LC}{h^2}\frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

analogue à l'équation du potentiel en supersonique :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \left(M^2 - 1\right)\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}$$

La figure I-62 montre les résultats obtenus en développant une technique de ce genre.

7.4. Les souffleries. — Pour rendre l'expérience plus facile, plus rapide et moins onéreuse, en aérodynamique quasi systématiquement on transpose le problème initial. Ainsi pour étudier les efforts qui s'exercent sur un avion se déplaçant dans une atmosphère immobile, on soumet une maquette immobile de l'avion (à échelle réduite) à un courant d'air de vitesse convenable. C'est ce que l'on réalise dans les installations appelées souffleries. Cette transposition n'est valable que si le principe du mouvement relatif et les lois de similitude sont rigoureusement appliqués.

Le principe du mouvement relatif impose que les conditions à la limite du champ aérodynamique correspondent à celles d'un champ infini. C'est impossible puisque les dimensions des souffleries sont forcément limitées : il

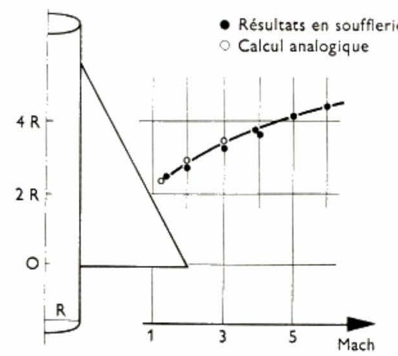


Fig. I-62

Détermination de la position du centre de poussée d'un ensemble aile-fuselage en supersonique à l'aide des réseaux

faudra en général appliquer des corrections, dites de limitation de veine, pour transposer les résultats obtenus au cas de l'atmosphère illimitée. Ces corrections seront cependant très faibles et pratiquement nulles si la taille de la maquette est assez petite vis-à-vis des dimensions de la soufflerie.

Examinons maintenant les lois de similitude : elles exigent que les valeurs d'un certain nombre de paramètres sans dimension soient conservées dans la transposition. Pour l'aérodynamique courante, lorsque le gaz employé pour les essais est de l'air, ces paramètres sont finalement au nombre de deux. Le plus important est le nombre de Mach car la description de l'écoulement et des phénomènes susceptibles de s'y produire est essentiellement liée à la valeur de ce paramètre (V. § 3).

Le second paramètre est le nombre de Reynolds $\frac{Vl}{\nu}$ qui caractérise les effets visqueux, les grandes valeurs du paramètre étant associées à une faible importance relative des effets de la viscosité.

Pour respecter la similitude il faudrait donc effectuer les essais dans une soufflerie fournissant un écoulement à des nombres de Mach et de Reynolds égaux à ceux rencontrés en vol.

On dispose pour cela de toute une gamme de souffleries suivant le nombre de Mach à réaliser.

Ces souffleries sont dites :

- — à basse vitesse pour $M < 0{,}3$,
- — subsoniques jusqu'à $M = 0{,}8$,
- — transsoniques pour $M \approx 1$,
- — supersoniques pour $M > 1$,
- — hypersoniques à partir de $M = 5$ ou 6.

Lorsque les conditions de similitude ne peuvent être exactement satisfaites, il faut alors évaluer l'influence des paramètres non respectés et corriger éventuellement les résultats expérimentaux. C'est souvent ce qui se produit pour le nombre de Reynolds qui, en essai, est généralement inférieur au nombre de Reynolds de vol.

L'extrapolation du résultat de soufflerie alors nécessaire ne peut être effectuée de façon satisfaisante que s'il n'y a pas de changement de régime pour le phénomène observé entre les deux valeurs considérées du nombre de Reynolds : par exemple, il ne faut pas de variation brutale de la position de la transition de la couche limite. C'est la raison pour laquelle on est parfois amené à imposer la position de la transition sur les maquettes, généralement grâce à des rugosités disposées dans la région du bord d'attaque, où elle intervient naturellement en vol.

7.4.1. Les souffleries subsoniques et supersoniques. — La conception des souffleries s'appuie sur les propriétés fondamentales des écoulements monodimensionnels exprimées principalement par les lois de détente isentropique (V. § 2.6) et par la relation d'Hugoniot qui relie la variation de la vitesse du fluide à celle de la section qu'il occupe :

$$\frac{dV}{V}\left(M^2 - 1\right) = \frac{dS}{S}$$

Cette relation résulte des lois de conservation de la masse et de la quantité de mouvement en l'absence de

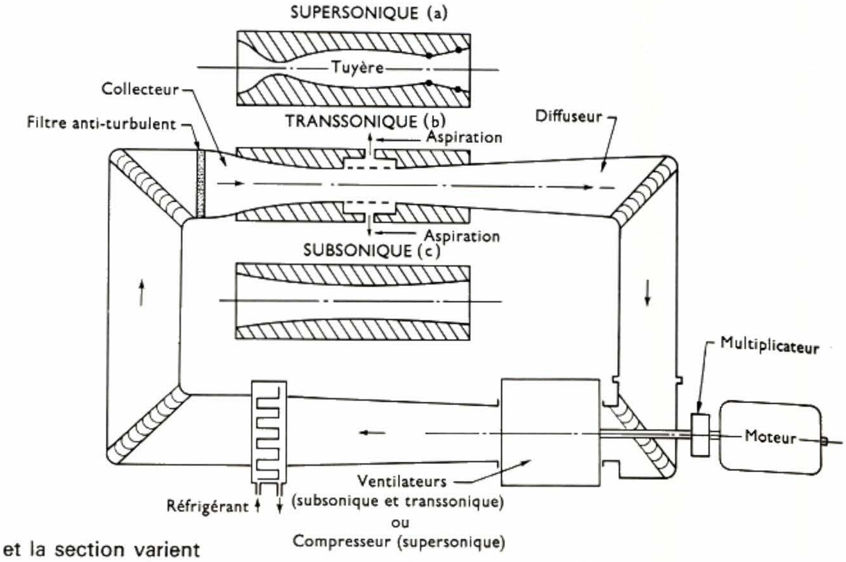


Fig. I-63
Soufflerie à retour

frottement ; elle montre que la vitesse et la section varient dans le même sens en supersonique et en sens contraire en subsonique ; elle indique par ailleurs que la vitesse du son ne peut être obtenue que dans une section minimale.

Les souffleries supersoniques et les souffleries subsoniques modernes sont des souffleries à retour (fig. I-63). Cette disposition en circuit fermé est favorable au rendement énergétique d'ensemble et permet de contrôler facilement la pression, la température et le degré hygrométrique de l'air. Il est important en effet que l'air utilisé pour les essais ne contienne pas de vapeur d'eau car la mise en vitesse, à partir de conditions au repos T_i, p_i d'un gaz, s'accompagne d'un refroidissement (V. la relation 7 du § 2.6) qui peut provoquer, dès $M = 0{,}6$, la condensation de la vapeur d'eau éventuellement contenue dans l'air et donc modifier considérablement la nature des phénomènes simulés (présence d'ondes de condensation parasites). Pour éviter cela, il convient d'alimenter le circuit avec de l'air desséché et de maintenir le degré de siccité de l'air constant en évacuant en permanence une certaine fraction de l'air du tunnel et en la remplaçant par de l'air rigoureusement desséché.

La pression d'alimentation du circuit pourra dépasser une atmosphère dans les souffleries dites pressurisées ou à densité variable dans lesquelles on cherche à obtenir des nombres de Reynolds élevés en augmentant la masse volumique $\left(\mathcal{R} = \frac{Vl}{\nu} = \frac{Vl\rho}{\mu}\right)$.

Les circuits des souffleries subsoniques et supersoniques à retour ont beaucoup de ressemblances : ils diffèrent cependant fondamentalement en amont et en aval de la veine d'essai, portion quasi cylindrique de circuit à vitesse uniforme où sont placées les maquettes.

Dans les souffleries subsoniques, la section du circuit est minimale au niveau même de la veine d'essai. Celle-ci est précédée d'un collecteur, partie convergente où l'écoulement s'accélère depuis la vitesse lente qu'il a dans le circuit de retour jusqu'à la vitesse d'essai qui reste inférieure à la vitesse du son ; elle est suivie d'un diffuseur, partie divergente où l'écoulement est ralenti avant d'effectuer le cycle de retour.

Dans les souffleries supersoniques, au contraire, la veine d'essai est précédée d'une tuyère convergente-divergente dont le col constitue la section minimale du circuit. Dans le convergent, la vitesse de l'écoulement augmente ; elle atteint Mach 1 au niveau du col de la tuyère. L'accélération de l'écoulement peut alors se poursuivre en supersonique dans les sections qui s'élargissent (divergent) jusqu'à la dimension de la veine d'essai.

L'obtention d'un écoulement uniforme dans la partie utile est liée au calcul rigoureux du profil de la tuyère (méthode des caractéristiques et correction de couche limite) et à une réalisation mécanique de haute précision.

À l'aval de la veine d'essai, l'écoulement est partiellement recomprimé en supersonique jusqu'à un second col ; peu en aval de celui-ci un choc normal à nombre de Mach modéré ramène l'écoulement en subsonique et la recompression se poursuit dans le diffuseur subsonique.

Dans les deux cas, le reste du circuit est constitué par la canalisation de retour qui comporte les éléments suivants :

— des aubages directeurs dans les coudes pour diminuer les pertes liées au changement de direction ;

— un ventilateur ou un compresseur qui compense les pertes de charges subies par l'écoulement dans l'ensemble du circuit ;

— un système de refroidissement pour éviter que la température de l'air ne s'élève progressivement en fonction du temps de fonctionnement ;

— des filtres destinés à réduire la turbulence de l'écoulement qui revient vers la veine d'essai.

La variation du nombre de Mach d'essai est très aisément obtenue dans les souffleries subsoniques, il suffit d'agir sur la vitesse de rotation du ventilateur. Il n'en est pas de même pour les souffleries supersoniques car le nombre de Mach engendré par la tuyère est directement relié au rapport des sections de la veine d'essai et du col de la tuyère. Dans ces souffleries, il est nécessaire de faire varier la géométrie de la tuyère pour obtenir une variation du nombre de Mach, soit par variation continue du profil de la tuyère au moyen d'une paroi déformable (ou par un léger pivotement des tuyères autour de la position nominale) dans le cas des veines à section rectangulaire (fig. I-64), soit par tuyères interchangeables.

7.4.2. Souffleries transsoniques. — La réalisation de souffleries fonctionnant au voisinage de Mach 1 pose des problèmes particuliers par suite des phénomènes suivants (fig. I-65).

1° *Le blocage de l'écoulement.* — La présence d'une maquette dans une veine guidée provoque une diminution locale de section, créant ainsi un col qui devient sonique dès que la vitesse amont atteint un certain niveau. Toute tentative pour augmenter le nombre de Mach à l'amont de la maquette devient alors inutile : on dit que l'écoulement est « bloqué ».

À titre indicatif, avec une obstruction relative de 1/100 (section maquette/section veine), on ne peut dépasser $M = 0{,}9$.

2° *La réflexion des ondes sur les parois.* — Une onde de choc engendrée par la maquette et réfléchie par la paroi revient vers celle-ci. Pour éviter cela, on est amené à limiter la longueur des maquettes. Au voisinage de Mach 1, où les perturbations se propagent quasi perpendiculairement à l'écoulement, cela conduit à des dimensions de maquettes beaucoup trop petites.

À la suite de délicates mises au point, on a pu résoudre ces problèmes en utilisant des veines spéciales à parois perméables, permettant une expansion transversale de l'écoulement qui élimine le phénomène de blocage. De

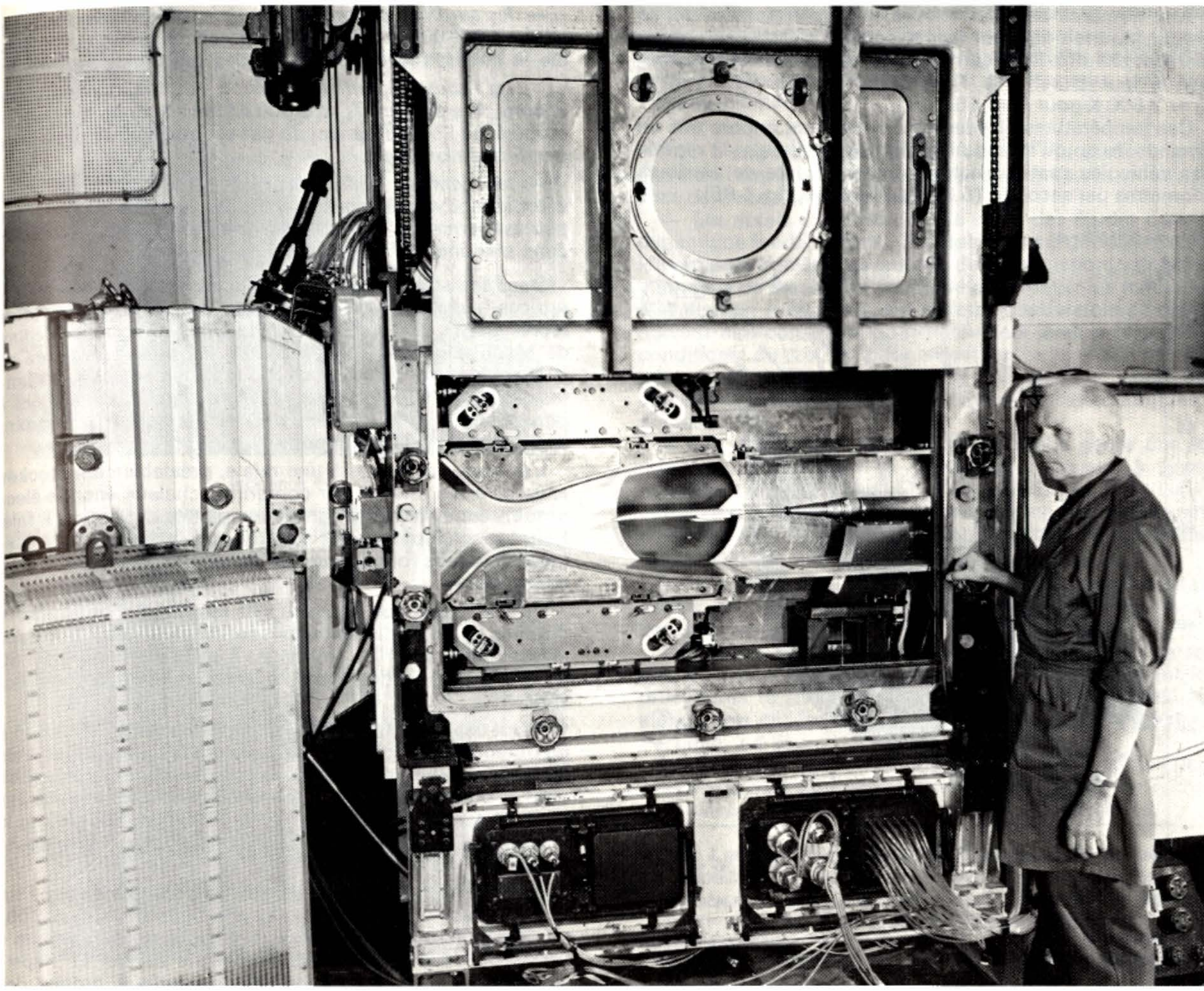


Fig. I-64 — Soufflerie supersonique à nombre de Mach variable (*O.N.E.R.A.*)

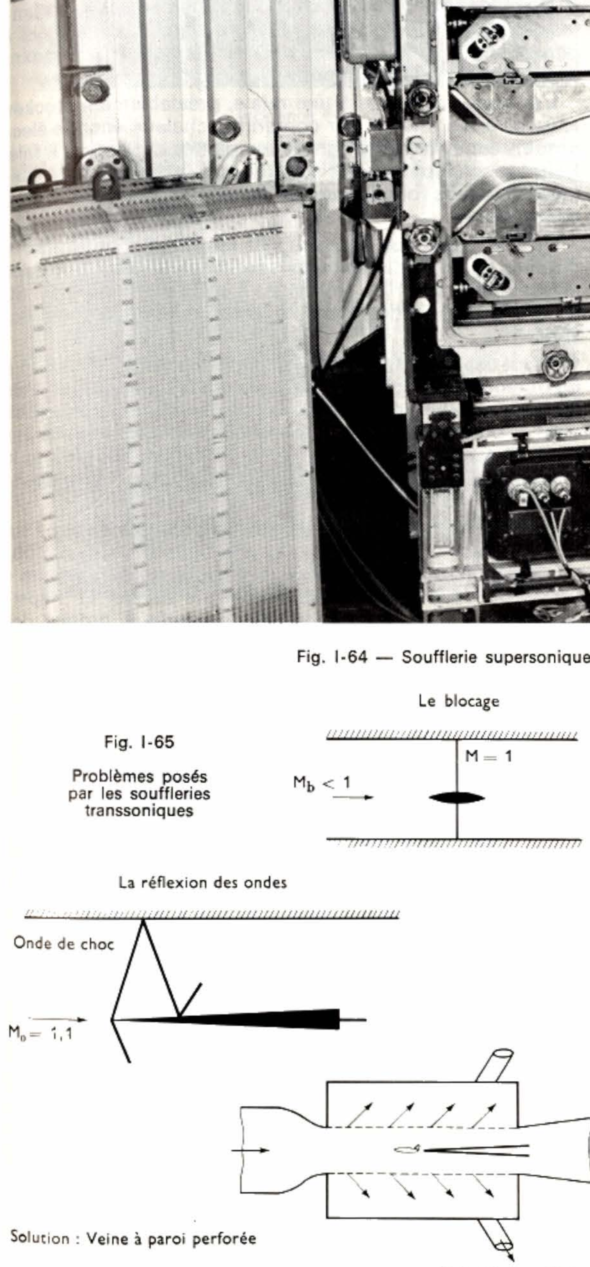


Fig. I-65

Problèmes posés par les souffleries transsoniques

plus, comme une onde de choc est réfléchie en une onde de choc par une paroi matérielle et en une onde de détente par une paroi fluide, on constate qu'il y a une certaine compensation avec les parois mixtes et que l'intensité des ondes réfléchies peut être ainsi considérablement réduite. On emploie soit des perforations fines réparties uniformément, soit des parois à fentes.

Les souffleries transsoniques sont de réalisation relativement récente : elles se sont développées après la seconde guerre mondiale pour étudier les problèmes de stabilité rencontrés lors des premiers vols transsoniques (on parlait alors du mur du son) ; elles ont permis de comprendre les phénomènes rencontrés en vol et d'y trouver des remèdes. Comme les méthodes de calcul théorique sont encore peu avancées dans le domaine transsonique, les études expérimentales effectuées dans ces installations sont particulièrement utiles, ce qui explique les efforts importants développés depuis deux décennies pour améliorer la qualité des veines transsoniques et déterminer les corrections à appliquer aux résultats. Cette expérimentation intéresse les avions subsoniques rapides : $M > 0{,}8$.

7.4.3. Les moyens d'essais hypersoniques. — Il a déjà été rappelé à propos des souffleries subsoniques et supersoniques que la mise en vitesse d'un gaz s'accompagne d'un refroidissement et d'une détente croissant avec le nombre de Mach. Pour l'air ($\gamma = 1{,}4$), la pression et la température obtenues au nombre de Mach M sont données par les formules de détente isentropique :

$$T = \frac{T_i}{1 + 0{,}2\, M^2}$$

$$p = \frac{p_i}{(1 + 0{,}2\, M^2)^{3{,}5}}$$

p_i et T_i caractérisent l'état générateur de l'air en état de repos.

Aux nombres de Mach élevés, le refroidissement qui se produit pourrait liquéfier l'air si celui-ci n'était pas préalablement chauffé. De façon pratique, pour éviter la liquéfaction il faut chauffer à $T_i = 1\,000$ K pour $M = 10$ et $T_i = 2\,500$ K pour $M = 16$.

Ces températures élevées sont cependant encore très en dessous de ce qu'il faudrait réaliser pour simuler la rentrée des véhicules spatiaux actuels à des vitesses de plusieurs kilomètres par seconde (5 000 à 10 000 K; fig. I-66).

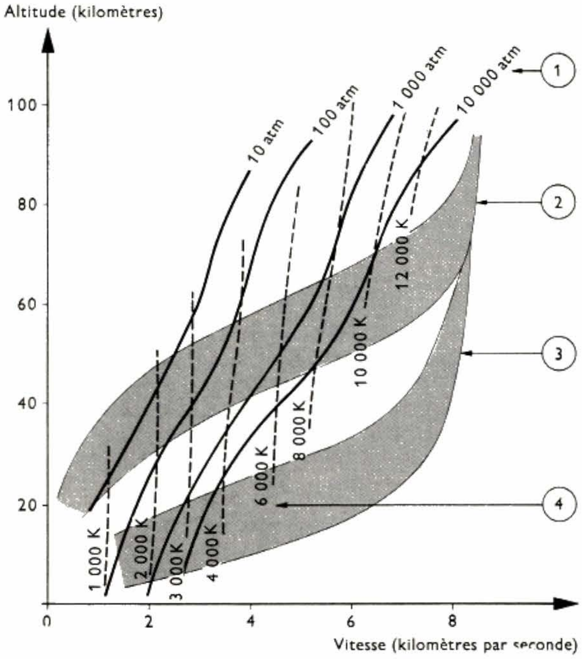


Fig I-66 — Pressions et températures génératrices nécessaires pour simuler la rentrée d'une sonde spatiale

1. Pressions génératrices. — 2. Domaines des rentrées planées. — 3. Domaines des rentrées directes. — 4. Températures génératrices

À ces températures extrêmes, l'état physico-chimique de l'air est complexe, les molécules d'oxygène et d'azote sont excitées, dissociées ou ionisées, de nouvelles espèces chimiques apparaissent et le comportement de l'écoulement ne peut plus être décrit sans faire intervenir les lois de cinétique chimique qui introduisent l'échelle des temps comme paramètre supplémentaire de similitude.

La nécessité de réaliser de grandes enthalpies génératrices et la difficulté de les produire expliquent la très grande variété des moyens d'essais en hypersonique. Ceux-ci peuvent être classés par rapport au degré de simulation thermique qu'ils permettent de réaliser. On distingue :

— *les souffleries tièdes*, où l'on cherche seulement à éviter la liquéfaction de l'air. Dans ces souffleries, les aspects dynamiques du vol seront bien représentés (efforts, pressions). Elles utilisent généralement des réchauffeurs à accumulation de chaleur ou à effet Joule qui permettent d'atteindre 2 000 à 2 500 K ;

— *les souffleries à haute enthalpie*, où des températures atteignant 7 000 K peuvent être obtenues grâce, par exemple, à l'utilisation d'arcs électriques qui chauffent le gaz ;

— *les tubes et souffleries à choc*, souffleries à enthalpie encore plus élevée ($T_i \approx 8\,000$ K) mais à nombre de Mach modéré, où l'échauffement du gaz est produit par le passage d'une onde de choc ;

— *les tunnels balistiques*, où toutes les conditions aérothermodynamiques arrivent à être satisfaites sur de très petites maquettes propulsées à grande vitesse par un canon dans une enceinte pressurisée.

Dans les souffleries hypersoniques, les pressions génératrices à réaliser pour obtenir des nombres de Reynolds représentatifs deviennent considérables lorsque le nombre de Mach augmente (V. fig. I-66) ; les pressions mises en jeu dans ces installations sont donc extrêmement importantes et, sauf exception, les souffleries hypersoniques sont à rafales, c'est-à-dire qu'elles ne fonctionnent que pendant des temps relativement courts.

L'énergie nécessaire à une rafale, préalablement stockée sous diverses formes (air comprimé, chaleur, énergie électrique), est utilisée pendant le temps très court de la rafale. Cette conception permet d'éviter que la puissance à installer pour faire fonctionner ces installations ne soit par trop considérable.

De façon pratique, les temps de rafales vont de quelques dizaines de secondes pour les souffleries tièdes à quelques millisecondes pour les souffleries à choc en passant par 50 à 100 millisecondes dans les souffleries à arc ou *hot shots*.

Il faut cependant signaler que dans des cas extrêmes on a pu obtenir des fonctionnements continus ou quasi continus en hypersonique : c'est le cas des souffleries à basse densité dont la puissance n'est pas considérable ; c'est aussi le cas d'installations industrielles où l'urgence des recherches a imposé un rythme d'essais accéléré au prix d'investissements considérables.

Un schéma typique d'une soufflerie à rafale est donné sur la figure I-67. On y retrouve l'élément important pour l'obtention d'une région d'écoulement uniforme et commun à toutes les souffleries hypersoniques : la tuyère. En hypersonique, la loi des sections déjà évoquée à propos des tuyères supersoniques conduit à des sections de col extrêmement petites ; pour cette raison, il n'est plus possible d'utiliser des tuyères planes et il faut recourir aux tuyères de révolution dont il est moins facile de faire varier la géométrie.

Le calcul du profil de ces tuyères est effectué d'abord par la méthode des caractéristiques en tenant compte de la loi d'état exacte (gaz réel), mais en négligeant la viscosité. Puis on calcule la couche limite qui se développe le long des parois et le profil est corrigé de l'épaisseur de déplacement de cette couche limite.

Il faut noter également la nécessité d'une aspiration en aval du diffuseur pour maintenir l'écoulement amorcé. Pour cela, on utilise généralement un réservoir que l'on vide entre deux rafales. Le volume du réservoir est tel qu'en fin de rafale la pression qui y règne est juste inférieure à la pression qui provoque le désamorçage de la tuyère.

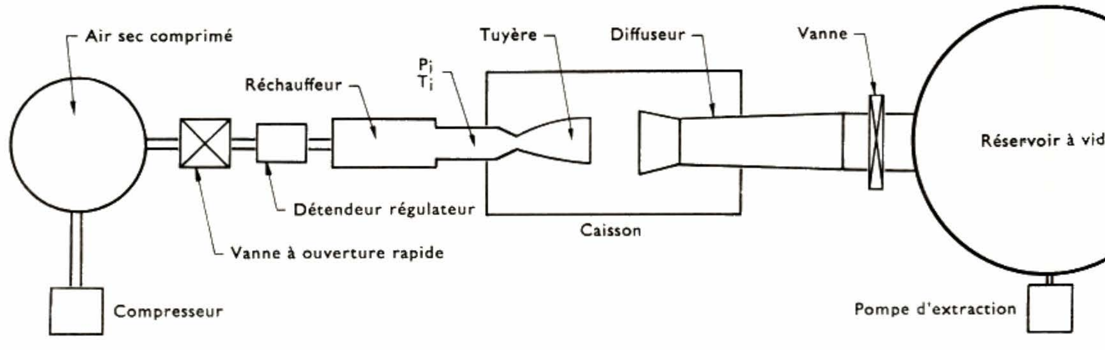
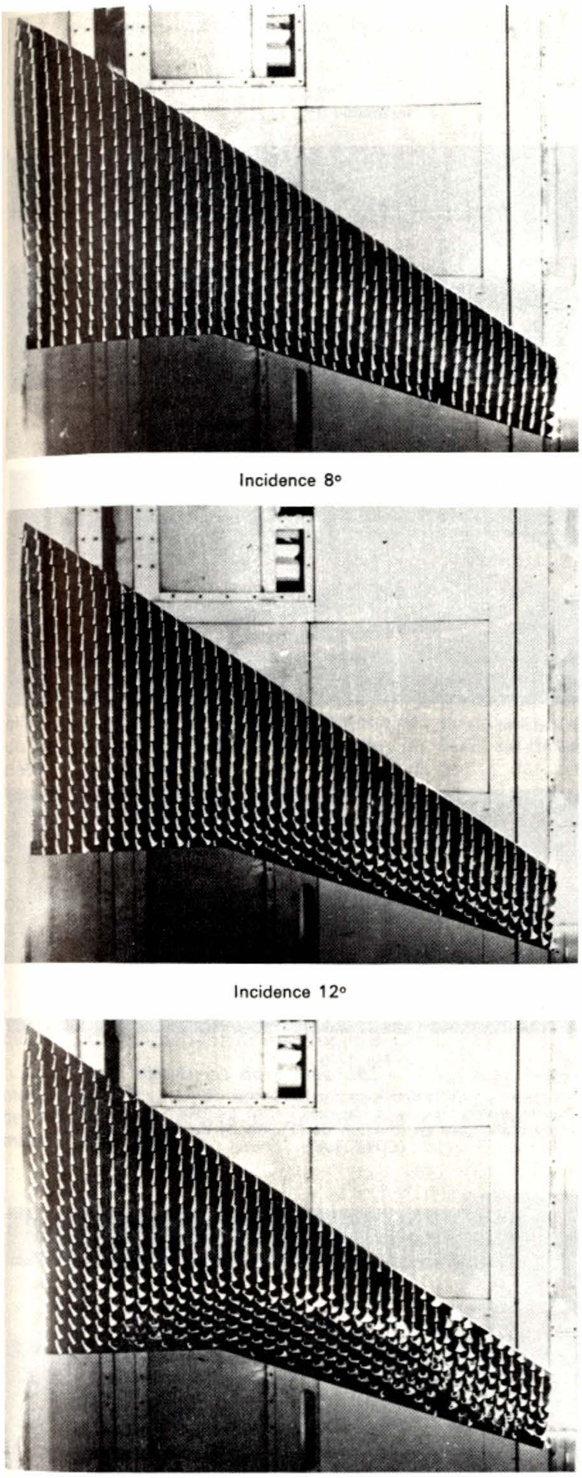


Fig. I-67 — Schéma de principe d'une soufflerie à rafales



Incidence 8°

Incidence 12°

Incidence 16°

Fig. I-68 — Visualisations de l'écoulement pariétal par brins de soie : étude du décrochage d'une aile en flèche (*O.N.E.R.A.*)

7.4.4. Les essais spéciaux. — La procédure de certification des avions impose que de très nombreux essais aient été exécutés.

Certains requièrent des moyens d'essais particuliers comme la soufflerie verticale pour l'étude de la vrille. Les maquettes utilisées, dynamiquement semblables à l'avion, sont lâchées dans un courant d'air ascendant et leur mouvement est cinématographié par plusieurs caméras. Les procédures de sortie de vrille peuvent être ainsi étudiées.

Parmi les autres types d'essais particuliers, citons les essais de givrage (de la vapeur d'eau est introduite volontairement dans l'air), les essais de parachute et les essais de largage de verrière, de bombes ou de réservoirs auxiliaires (avions militaires).

7.5. L'expérimentation en vol. — Au stade le plus élevé de l'expérimentation se trouvent les essais en vol qui sont de deux types principaux :

— Les essais effectués dans le cadre des études d'aérodynamique fondamentale. Ces essais sont organisés spécialement pour combler les lacunes de la simulation, valider les méthodes de mesure en soufflerie et éprouver les méthodes d'évaluation théoriques. De véritables laboratoires volants doivent être constitués pour déterminer avec précision les conditions du vol et pour effectuer toutes les mesures nécessaires à l'interprétation de l'expérience ; aussi ces opérations sont-elles extrêmement coûteuses et longues à préparer.

À titre d'exemples, des opérations de ce genre ont été montées pour étudier le frottement turbulent à grand nombre de Reynolds (fusée D 6 de l'O.N.E.R.A., V. fig. I-49), le transfert thermique et le comportement des revêtements ablatifs à grand nombre de Mach, le sillage des véhicules hypersoniques, etc.

— Les essais systématiques auxquels sont soumis tous les avions pour obtenir le certificat de navigabilité qui sanctionne le respect de toutes les normes de sécurité.

Ces essais visent à déterminer les performances garanties, les qualités de vol et à délimiter les domaines de vol, les procédures d'atterrissage, de décollage et toutes les manœuvres nécessaires en vol normal ou en cas de panne. (V. chap. 3 § 2).

Les résultats d'essais comparés aux prévisions du calcul et aux essais en soufflerie permettent d'améliorer les méthodes utilisées pour la définition et le calcul des avions.

7.6. Les techniques de visualisation et de mesure. La nécessité d'évaluer avec plus de précision les performances et les qualités de vol des aéronefs a conduit l'aérodynamicien à effectuer des investigations de plus en plus poussées.

En même temps, le nombre des essais nécessaires pour optimiser des projets toujours plus complexes s'est considérablement accru et il est devenu progressivement indispensable de recourir à une automatisation de l'acquisition et du traitement des résultats de mesures.

Cela a été rendu possible grâce aux progrès de l'électronique et des ordinateurs. Les procédés d'investigation utilisés en aérodynamique sont d'une grande variété. Les plus importants sont la visualisation de l'écoulement, les mesures de pressions, les mesures d'efforts, les mesures de flux thermiques.

7.6.1. Les procédés de visualisation. — Ils ont pour but de faciliter la compréhension des phénomènes qui peuvent se produire dans le champ aérodynamique (décollements, tourbillons, chocs, etc.).

Dans le domaine subsonique, on a surtout cherché à caractériser l'écoulement à la paroi des maquettes grâce à diverses techniques : brins de soie collés à la paroi (fig. I-68), enduits ou peintures déposés à la surface de la maquette (V. fig. I-69) ou encore émis par des orifices ménagés dans la paroi. Dans le cas de très basses vitesses, on a également réussi à visualiser des lignes d'émission (identiques aux trajectoires et aux lignes de courant quand le mouvement est permanent) grâce à des filets de fumée émis dans la soufflerie en amont de la maquette (V. fig. I-70). Enfin, il faut signaler la technique de l'enduit sublimable (acénaphtène) qui permet de localiser la position de la transition de la couche limite, l'enduit disparaissant rapidement des régions où la couche limite est turbulente par suite du frottement et du transfert de chaleur élevé qui se produit au niveau de la paroi (V. fig. I-71).

Aux plus grandes vitesses ($M > 0{,}8$), la mise en œuvre des méthodes optiques s'est révélée particulièrement fructueuse. Ces méthodes utilisent les variations de l'indice de réfraction de l'écoulement directement lié à la masse volumique locale par la loi de Gladstone : $(n - 1)/\rho =$ Cte.

Fig. I-69 a et b

Visualisations pariétales
à l'oxyde de titane
$V_0 = 90$ m/s. Incidence 15°
(*O.N.E.R.A.*)

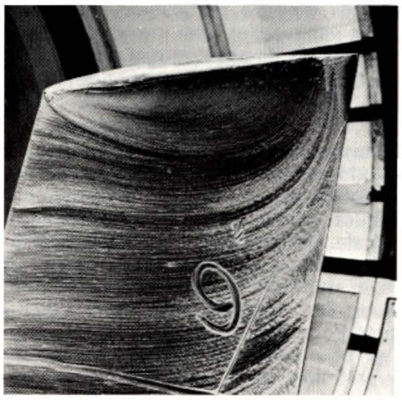
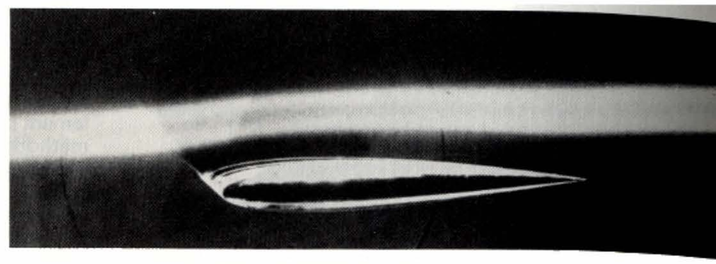


Fig. I-69 a — Côté extrados,
vue de détail de l'extrémité

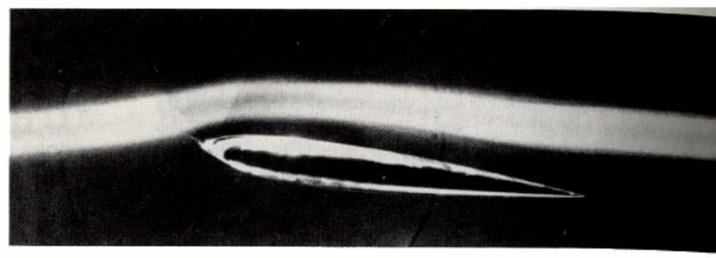


Fig. I-69 b — Côté intrados, vue générale

Incidence 0°



Incidence 9°



Incidence 14°

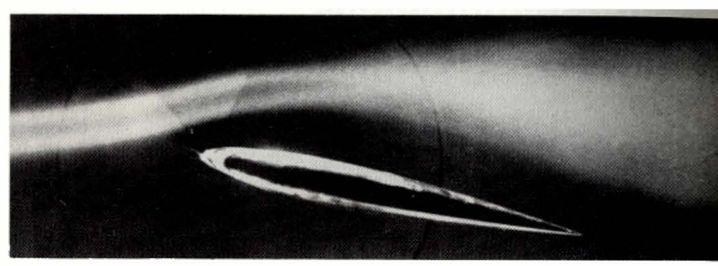
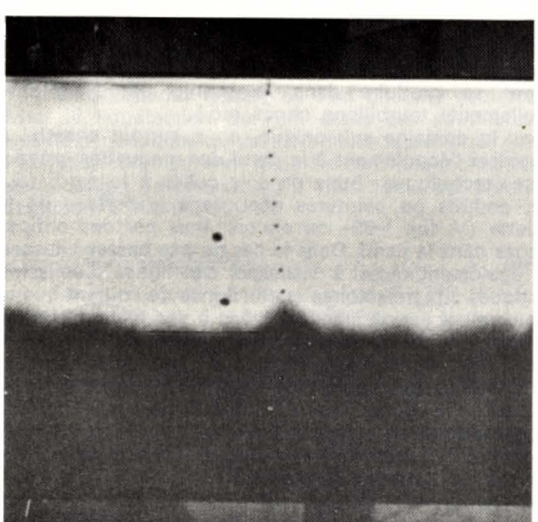


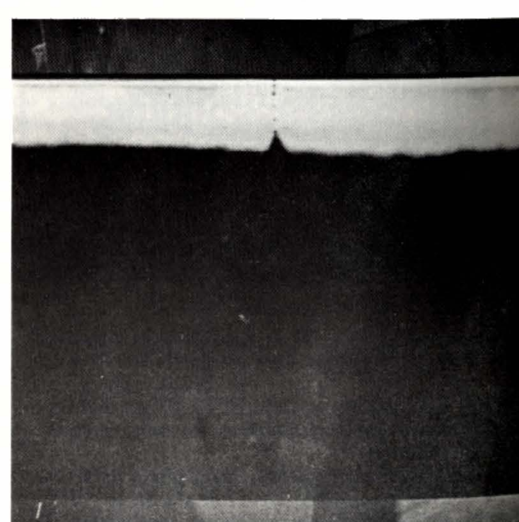
Fig. I-70

Visualisations par fumée :
Étude de la variation de la trajectoire d'un tourbillon émis
à l'amont d'une pale en fonction de l'incidence de cette pale
(*O.N.E.R.A.*)



Incidence 0°

$V_0 \downarrow$



Incidence 6°

Fig. I-71 — Étude de la transition sur le profil N.A.C.A. 0012 (vitesse : 40 m/s, corde : 0,4 m) (*O.N.E.R.A.*)

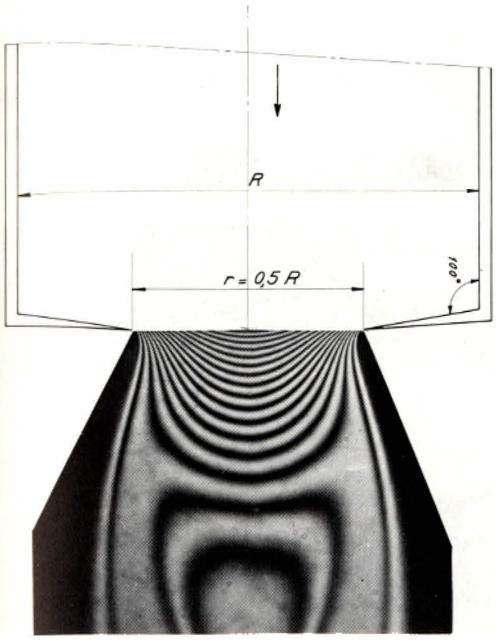


Fig. I-72 — Interférogramme d'un jet de révolution (*O.N.E.R.A.*)

Suivant le montage optique employé, on obtient sur les clichés une variation du noircissement liée aux variations de la masse volumique (interférométrie : fig. I-72) ou de sa dérivée première (strioscopie) ou encore de sa dérivée seconde (méthodes des ombres : fig. I-73).

Ces méthodes sont surtout utiles dans le cas où la masse volumique varie rapidement, donc pour les chocs et les couches limites en écoulement compressible.

Cependant lorsque les masses volumiques sont faibles, comme c'est souvent le cas en hypersonique, la sensibilité de ces méthodes devient insuffisante et il n'est guère possible de déceler autre chose que les ondes de choc très intenses. On a alors recours à d'autres méthodes : on provoque une luminescence au sein de l'écoulement par décharges électriques, champ électrique à haute fréquence ou bombardement électronique (fig. I-74).

7.6.2. Les mesures de pression. — Elles sont extrêmement importantes en aérodynamique car elles permettent de déterminer la vitesse qui ne peut pas, en général, être mesurée directement.

En incompressible, par exemple, la loi de Bernoulli permet de calculer la vitesse à partir de deux mesures locales : pression statique p et pression d'arrêt p_i :

$$p + \rho \frac{V^2}{2} = p_i \qquad V = \sqrt{\frac{2(p_i - p)}{\rho}}$$

Ces pressions sont mesurées à la paroi des maquettes (pression statique) ou à l'aide de sondes au sein du fluide (pression statique et pression d'arrêt suivant le type de la sonde).

Avec le progrès technique, les manomètres à liquide ou à capsule anéroïde ont progressivement été remplacés par des capteurs à membranes plus précis ayant des temps de réponses plus courts, et dont le signal peut être aisément amplifié et enregistré sous formes numériques. C'est la mesure de la déformation de la membrane qui par l'intermédiaire d'un étalonnage fournit la mesure de la pression. La détection de cette déformation est effectuée en utilisant divers principes :

— variation de la résistance de fils tendus entre la membrane et un support ou de jauges extensométriques collées sur la membrane ;

— variation de capacité du condensateur formé par la membrane et par une électrode fixe ;

— variation de l'induction entre deux minuscules bobines placées de part et d'autre de la membrane.

La réduction des temps de réponse imposée par l'utilisation des souffleries à rafales conduit à réduire le plus possible la longueur de la canalisation entre le capteur et l'orifice de mesure et donc à installer le capteur dans la maquette ; c'est la raison pour laquelle il a fallu développer des capteurs de très petites dimensions (fig. I-75).

7.6.3. L'anémomètre à fil chaud. — Le problème de la mesure directe des vitesses évoqué précédemment a reçu une solution acceptable au stade du laboratoire pour les écoulements à faible vitesse : l'anémomètre à fil chaud. Celui-ci est constitué par un fil de platine extrêmement fin,

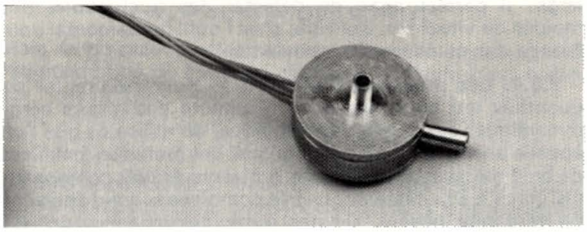


Fig. I-75 — Capteur de pression miniature (*O.N.E.R.A.*)

Fig. I-73

Ombrographie de l'écoulement autour d'une tête de rentrée obtenue au tunnel de tir (M = 1,11) (*I.S.L.*)

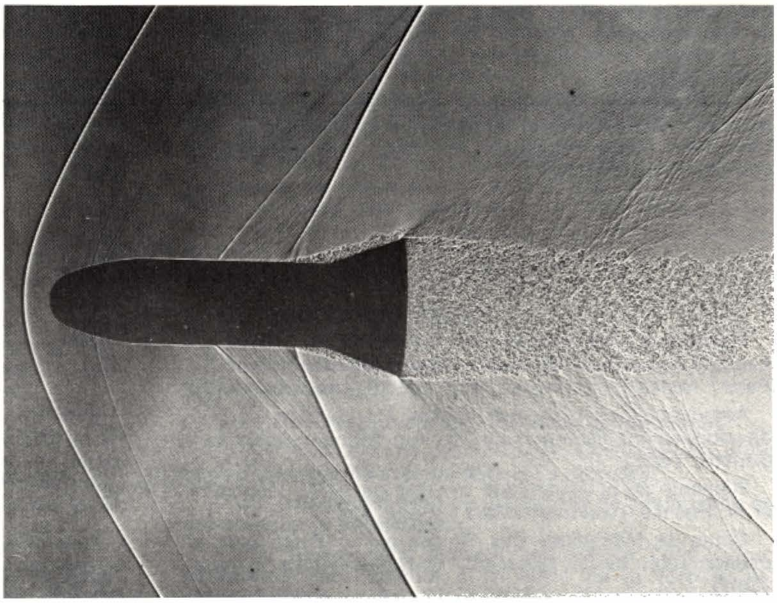
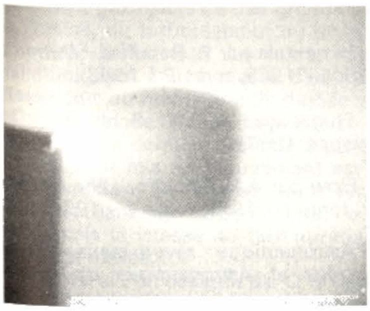


Fig. I-74

Visualisation par faisceau électronique : éclatement de jet à haute altitude (*O.N.E.R.A.*) $\left(\frac{\text{pression génératrice du jet}}{\text{pression extérieure}} = 12\,000\right)$



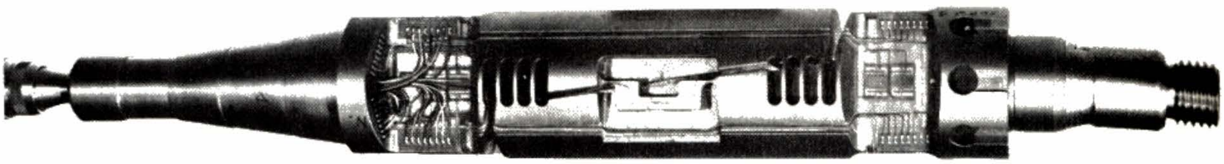


Fig. I-76

Élément sensible d'une balance en dard (*O.N.E.R.A.*)

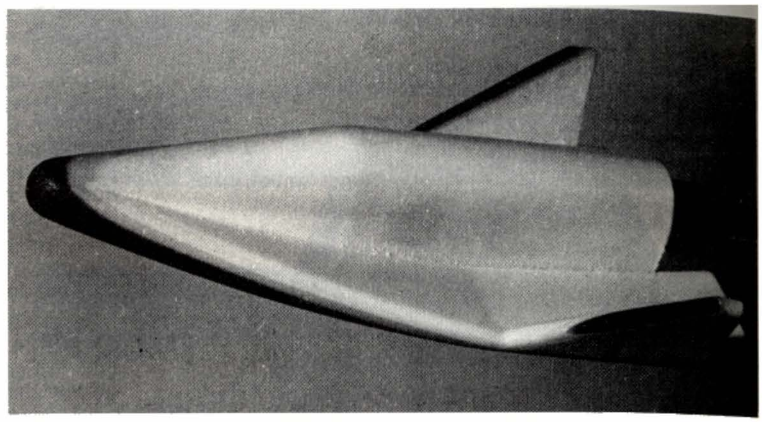


Fig. I-77

Visualisation par peinture thermovirante des zones où l'échauffement cinétique est maximal (planeur hypersonique à M = 10) (*O.N.E.R.A.*)

tendu entre deux broches et parcouru par un courant. L'énergie dissipée par le fil étant fonction de la vitesse du courant d'air dans lequel il est plongé, il est possible, après un étalonnage, de se servir de l'appareil pour la mesure des vitesses. Il existe plusieurs façons d'alimenter le fil, mais celle qui conduit à la meilleure précision et au meilleur temps de réponse, consiste en une alimentation asservie de telle manière que la température du fil, et donc sa résistance, reste constante. Un appareil de ce genre est d'un emploi délicat à cause de la fragilité du fil, mais il présente l'avantage considérable d'avoir une bande passante extrêmement large. Il permet donc de détecter des fluctuations très rapides de vitesse et, à ce titre, c'est l'outil fondamental pour l'étude des écoulements turbulents.

7.6.4. Les mesures d'efforts. — Pour mesurer les six quantités qui caractérisent la résultante des efforts aérodynamiques sur la maquette en essai, on utilise ce que l'on appelle une balance aérodynamique. Les premières balances de type mécanique séparaient la mesure des six composantes grâce à une cinématique très complexe et conduisaient à de véritables pesées. De nos jours, ces balances ont été modernisées en substituant à la pesée la mesure de la déformation d'une lame extensométrique ou remplacées par des balances en dard (fig. I-76). Dans ce cas, la maquette est fixée par l'arrière sur un barreau métallique dont on mesure la déformation. Là encore il faut recourir à un étalonnage pour obtenir la relation entre la déformation mesurée et l'effort appliqué.

L'avantage de ces balances particulières est de moins perturber l'écoulement et de permettre les mesures en des temps très courts (dans les « hot shots » une polaire peut être obtenue en 25 ms).

Elles ont rendu possible la mesure des dérivées aérodynamiques instationnaires dont la connaissance est indispensable pour l'évaluation des qualités de vol d'un avion (en particulier les coefficients $C_{m\alpha}$, C_{mq}, C_{nz}, C_{nq} ; V. chap. 3).

Pour cela, la maquette montée sur un dard dynamométrique est mise en oscillations forcées successivement autour de chacun de ses axes principaux et les informations du dynamomètre et celles d'un détecteur de position sont enregistrées. Les essais sont effectués avec et sans vent de façon à pouvoir éliminer les forces d'inertie, puis dépouillées numériquement.

7.6.5. Les mesures des flux thermiques. — L'étude des véhicules supersoniques et hypersoniques, dont la structure doit résister aux efforts et aux échauffements, exige la connaissance des flux thermiques. Pour les mesurer en soufflerie, on peut employer une des trois méthodes suivantes :

— utiliser un fluxmètre qui comporte un élément calorimétrique dont on mesure l'élévation de température ;

— utiliser la paroi de la maquette elle-même comme élément calorimétrique et mesurer l'élévation de sa température, par exemple, avec des thermocouples ;

— revêtir la maquette fabriquée en matériau isolant, d'une peinture dont la couleur évolue en fonction de la température qui a été atteinte (peinture thermovirante).

Cette dernière méthode peut conduire à une exploitation quantitative mais son principal intérêt est de fournir directement une « carte thermique » de la maquette et de signaler l'existence d'éventuels points chauds que les autres méthodes, discrètes, pouvaient laisser passer inaperçus (fig. I-77).

BIBLIOGRAPHIE

Mécanique des Fluides par E.A. Brun, A. Martinot-Lagarde avec la collaboration de J. Mathieu (*Dunod - Paris : tomes 1 - 2e édition et 2 - 1968, tome 3 - 1970*).

Aérodynamique : Thèmes choisis à la lumière de leur développement historique, par Th. Von Karman (*Interavia - Genève, 1956*).

Éléments de la dynamique des gaz par H.W. Liepmann et A. Roshko (*Gauthier-Villars - Paris, 1962*).

Cours de Mécanique des Fluides par J. Peres avec la collaboration de L. Malavard. (*Gauthier-Villars - Paris, 1936*).

Aérodynamique expérimentale par P. Rebuffet. (*Dunod - Paris : tome 1 - 3e édition - 1969, tome 2 - 1966*).

Aerodynamik der Flugzeuge par H. Schlichting et E. Truckenbrodt. (*Springer, 1967*).

Compressible Fluid Flow par A.H. Shapiro. (*The Ronald Press Cie - New York, tome 1 - 1953, tome 2 - 1954*).

L'Aéronautique et l'Astronautique : *revue mensuelle de l'Association Aéronautique et Astronautique de France (A.A.A.F.)*.

CHAPITRE II

PROPULSION

Note préliminaire : Dans ce chapitre, les principes de la thermodynamique ne seront pas évoqués. Ils ont fait l'objet d'une étude complète au tome 1 (V. t. 1, Thermodynamique).

Pour la même raison, la théorie des moteurs à pistons ne sera pas traitée, car les moteurs de ce type qui équipent les aéronefs sont identiques, tout au moins dans leurs principes, à ceux utilisés sur véhicules terrestres (V. t. 4, La route, chap. 5).

1. PRINCIPES DE LA PROPULSION

1.1. Introduction. — Tout système de propulsion repose sur l'application du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, quel que soit le milieu dans lequel il doit fonctionner. Suivant ce principe, toute action d'un corps sur un autre s'accompagne d'une réaction qui lui est directement opposée et égale. Lorsqu'il s'agit d'un corps en mouvement, il faut distinguer deux cas suivant la nature de l'appui qui fournit la réaction :

— *réaction d'un appui fixe:* ce cas se présente dans la marche à pied ou pour la propulsion des automobiles. La réaction du sol est indispensable dans ces deux exemples, comme le démontre l'impossibilité de se déplacer sur un sol parfaitement verglacé ;

— *réaction d'un appui mobile:* ce cas se rencontre lors de déplacements dans l'eau ou l'air, et plus généralement lorsqu'un corps en mouvement envoie de la matière vers l'arrière, prenant en quelque sorte appui sur cette matière.

1.2. La propulsion aérienne. — Contrairement à ce que peut laisser croire la dénomination courante de propulsion par réaction, tout système propulsif d'engin aérien fait appel à la réaction sur appui mobile (air ambiant et gaz éjectés, ou seulement gaz éjectés à très grande altitude), qu'il s'agisse de l'hélice, du turboréacteur ou de la fusée. Si l'on excepte le moteur-fusée, tous les autres organes de propulsion communiquent à une masse d'air prélevée à l'avant une vitesse plus ou moins grande dirigée vers l'arrière.

Dans le cas de l'hélice, quel que soit le mode d'entraînement de cette dernière (moteur à pistons ou turbine à gaz), le débit d'air mis en mouvement est très important, mais l'augmentation de vitesse qu'il reçoit est limitée. Au contraire, dans un turboréacteur, le débit d'air est plus faible, mais la vitesse du flux gazeux qui s'échappe de la tuyère est élevée.

Dès lors, si l'on désigne par Q le débit en masse de fluide intéressé et par V_0 et V_1 les vitesses avec lesquelles le système de propulsion l'absorbe (entrée) et le rejette (sortie), l'application du théorème des quantités de mouvement permet d'écrire que la poussée est égale à :

$$F = Q(V_1 - V_0)$$

La puissance propulsive, produit de la poussée et de la vitesse de déplacement de l'avion qui n'est autre que V_0, s'écrit alors :

$$W_p = F.V_0 = QV_0(V_1 - V_0)$$

Mais la puissance effectivement dépensée correspond à l'augmentation de l'énergie cinétique du fluide, c'est-à-dire à :

$$W = \frac{1}{2} Q\,(V_1^2 - V_0^2)$$

On peut alors définir le rendement de propulsion du moteur qui est le rapport de la puissance propulsive à la puissance effectivement dépensée, soit :

$$\eta_p = \frac{W_p}{W} = \frac{2\,V_0}{V_0 + V_1}$$

Toutes ces formules sont théoriquement applicables à tous les modes de propulsion. Cependant, dans le cas de la propulsion à hélice, les grandeurs Q et V_1 sont difficiles à caractériser. On peut en déduire que le rendement est d'autant plus élevé que la vitesse d'éjection du fluide est plus proche de la vitesse de vol. De plus, dans ces conditions, la formation de zones tourbillonnaires entre le jet et l'ambiance est minimisée. C'est ainsi que la propulsion à hélice se trouve bien adaptée au vol à faible vitesse, alors que le rendement du turboréacteur croît avec cette vitesse de vol.

2. LE TURBORÉACTEUR

2.1. Fonctionnement. — Dans sa formule la plus simple, il comprend :

— un compresseur aspirant l'air extérieur en amont,

— une chambre de combustion dans laquelle l'air comprimé est brûlé avec un apport de carburant,

— une turbine qui est mue par les gaz de combustion et qui entraîne le compresseur,

— une tuyère dans laquelle les gaz de combustion poursuivent leur détente à la sortie de la turbine en produisant la poussée.

La vitesse d'éjection des gaz de combustion à la sortie de la tuyère dépend de la vitesse de vol ; elle est voisine de 800 m/s pour une vitesse de vol subsonique et de 1200 m/s pour une vitesse supersonique. Pour le rendement de propulsion, la formule précédente donne des valeurs proches de 0,4 pour l'avion subsonique et de 0,7 pour l'avion supersonique.

Pour améliorer le rendement aux vitesses subsoniques il faut donc réduire la vitesse d'éjection des gaz de combustion car elle présente un trop grand écart avec la vitesse de vol. C'est pour atteindre ce but qu'a été imaginé le turboréacteur à double flux. Le principe de ce dernier consiste à absorber à l'entrée un volume d'air beaucoup plus important que celui destiné à suivre le cycle thermodynamique complet du moteur ; le volume d'air excédentaire est directement mélangé, dans la tuyère d'éjection, aux gaz de combustion dont ils réduisent la vitesse. La compression de l'air incident est alors décomposée en deux étapes : d'abord compression de la totalité du volume d'air par une soufflante de grand diamètre, puis compression dans le compresseur du réacteur de la partie du flux destinée à subir la combustion et appelée *flux principal* (l'autre partie de l'air issue directement de la soufflante constituant le *flux secondaire*). Le rapport des débits du flux secondaire au flux principal τ est appelé *taux de dilution*. Si l'on considère l'ensemble des réacteurs à double flux en service, τ est compris entre 0,5 et plus de 6. L'optimum de rendement d'un double flux est obtenu lorsque la vitesse du flux secondaire est environ égale à 80 % de la vitesse du flux primaire. Pour des vitesses de vol subsoniques, on parvient alors à des valeurs du rendement de propulsion voisines de 0,70. Du fait de l'accroissement du débit d'air absorbé, la poussée développée par un double flux est plus importante que celle du turboréacteur monoflux correspondant. La formule double flux comporte encore deux avantages intrinsèques : la réduction de la consommation spécifique et la réduction du bruit émis.

La consommation spécifique est le rapport du débit en masse $\frac{q}{t}$ de carburant à la poussée F :

$$c_s = \frac{q}{t} \cdot \frac{1}{F}$$

Il s'exprime donc généralement en kilogrammes par décanewton-heure (symbole : kg/daN . h) unité du système SI qui remplace l'ancienne unité : le kilogramme par kilogramme force-heure (1 kg/daN . h $\approx$ 1 kg/kgf . h).

Ce paramètre matérialise en fait le rendement thermopropulsif du réacteur, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie effectivement dépensée pour la propulsion et l'énergie thermique du carburant, η_{tp}. Si l'on appelle rendement thermique η_{th}, le rapport de l'énergie cinétique du jet à l'énergie thermique du carburant et η_p le rendement de propulsion, on a la relation : $\eta_{tp} = \eta_p \, \eta_{th}$. L'amélioration de la consommation spécifique sur un réacteur double flux s'explique par le fait que la production du jet froid est obtenue à partir d'une quantité d'énergie plus faible. À titre d'exemple, les meilleurs réacteurs double flux actuels présentent une consommation spécifique inférieure à 0,5 kg/daN . h, soit près de la moitié de celle des réacteurs des avions de transport subsoniques de première génération. De plus, la réduction de la vitesse du jet a également une influence non négligeable sur le bruit du moteur. Le bruit émis par un turboréacteur en fonctionnement est la résultante d'un bruit de compresseur, d'un bruit de turbine et d'un bruit de jet. L'intensité de ce dernier est pratiquement proportionnelle à la huitième puissance de la vitesse du jet ; on conçoit que la réduction de cette dernière élimine pratiquement le bruit de jet.

La postcombustion. — Sur les avions d'armes, il peut être utile d'accroître fortement la poussée pendant de courtes durées. Un tel résultat a pu être obtenu grâce à la postcombustion. Pour ne pas porter les gaz de combustion à une température supérieure à la limite supportable par les ailettes de turbine, l'air introduit dans la chambre est très largement en excès par rapport au carburant ; aussi, les gaz éjectés en aval de la turbine contiennent-ils encore de l'oxygène qui peut être utilisé pour brûler du combustible. Cette seconde combustion, réalisée derrière la turbine (d'où son nom) augmente la température des gaz, donc leur vitesse, et par suite la poussée du moteur. En revanche, pour une même vitesse de vol V_0, le rendement propulsif $\eta_p = \frac{2 V_0}{V + V_0}$ est inférieur dans le cas de la postcombustion, du fait de l'augmentation de la vitesse du jet V.

La postcombustion se traduit donc également par une consommation spécifique assez élevée qui peut atteindre 2 kg/daN . h. On caractérise généralement la postcombustion par le rapport r de la poussée obtenue à la poussée du réacteur sec c'est-à-dire postcombustion éteinte : $r = \frac{F}{F_0}$. Ce rapport peut atteindre 1,5 avec les turboréacteurs simple flux. L'introduction de la formule double flux dans le domaine des moteurs militaires a conduit à appliquer la postcombustion à ce type de moteur ; celle-ci peut intervenir soit sur le seul flux chaud, soit sur les deux flux à la fois. On peut alors atteindre une augmentation de poussée de 1,8.

Le cycle thermodynamique d'un turboréacteur est celui de la turbine à gaz.

2.2. Aérodynamique des éléments du turboréacteur. — Le principe de fonctionnement d'un turboréacteur se caractérise par le fait que, tout au long du cycle, le fluide de travail est l'objet de transformations de vitesse en pression et inversement.

2.2.1. Entrée d'air. — C'est un conduit de section variable calculé de telle sorte que l'énergie cinétique de

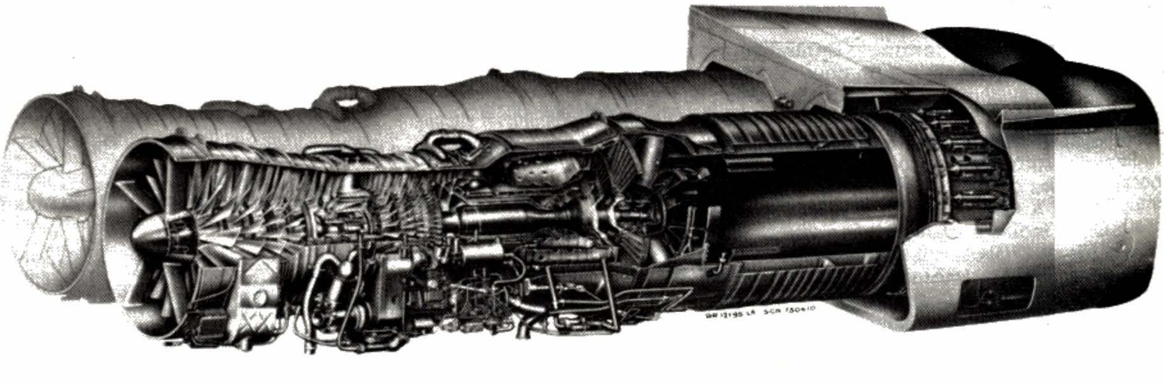


Fig. II-1 — Turboréacteur « Olympus 593 » (*Rolls-Royce - S.N.E.C.M.A.*)

l'air incident se transforme en énergie de pression. La forme à donner à ce conduit diffère selon que la vitesse de vol est inférieure ou supérieure à la vitesse du son.

L'efficacité d'une entrée d'air se mesure par le coefficient :

$$C_p = \frac{P_t - P_0}{q_0}$$

où l'on désigne par P_t la pression totale juste en amont du compresseur, par P_0 et q_0 respectivement la pression statique et la pression dynamique de l'air incident.

L'étude des entrées d'air est faite au paragraphe 5.

2.2.2. Compresseur

Compresseur axial. — Il se compose d'une série de grilles constituées d'aubes montées perpendiculairement à la périphérie d'une roue. Ces grilles sont alternativement fixes et mobiles et se font face de l'une à l'autre (fig. II-1). Les grilles fixes sont montées sur le stator et les grilles mobiles sur le rotor. Une grille fixe et la grille mobile qui la précède constitue un étage.

Le processus de la compression consiste alors à communiquer à l'air une grande vitesse par entraînement au moyen des aubes des grilles mobiles, puis à transformer cette vitesse en pression. Pour comprendre la variation de vitesse à travers une grille mobile, il faut d'abord distinguer la vitesse absolue $\vec{V_0}$ de l'air par rapport à la structure fixe du réacteur, et la vitesse relative $\vec{W_0}$ par rapport à la roue, la vitesse absolue étant égale à la somme vectorielle de la vitesse relative et de la vitesse de rotation de la roue.

La figure II-2 montre comment la vitesse $\vec{V_0}$ est transformée, après traversée de la grille mobile, en une vitesse $\vec{V_1}$ supérieure ; mais la vitesse relative $\vec{W_1}$ à la sortie de la grille mobile est inférieure à la vitesse d'entrée $\vec{W_0}$ (action de déflexion due à la présence d'un profil, placé sous incidence, dans un écoulement). La grille mobile a donc

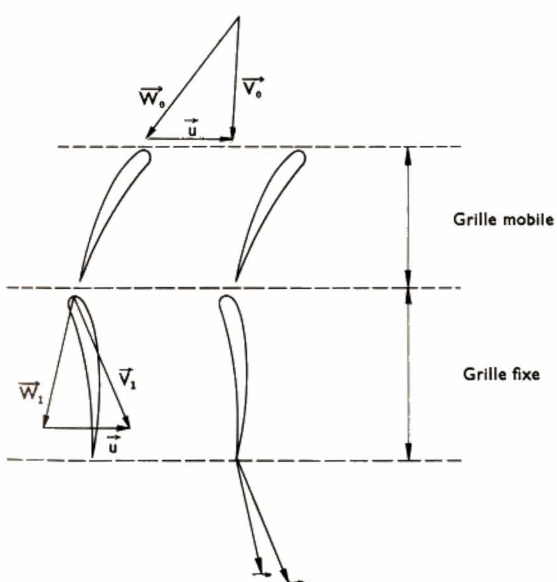


Fig. II-2 — Diagramme des vitesses dans un étage de compresseur ($\vec{u}$: vitesse de déplacement des grilles mobiles par rapport à la grille fixe)

augmenté la pression de l'air. La vitesse absolue $\vec{V_1}$ est ensuite transformée par passage dans une grille fixe en une vitesse $\vec{V_2}$ légèrement plus faible mais de direction pratiquement axiale, ce qui se traduit encore par un accroissement de pression. En définitive, l'étage a permis d'augmenter la pression, en maintenant la vitesse de sortie voisine en grandeur et en direction de la vitesse d'entrée. L'écoulement à la traversée d'un étage de compresseur axial est donc d'abord dévié vers l'extérieur par la grille mobile, puis ramené vers l'axe par la grille fixe.

Compresseur centrifuge. — Il se compose d'un disque en rotation sur l'une des faces duquel sont montées des plaques qui canalisent l'air vers la périphérie. Autour du disque se trouve une grille fixe, qui, comme dans un étage de compresseur axial, transforme en pression une partie de la vitesse absolue à la périphérie du disque.

Du fait de l'effet centrifuge, un compresseur centrifuge conduit à un rapport de pression plus grand qu'un étage de compresseur axial. Cependant, la possibilité de monter en série des étages axiaux permet de multiplier considérablement le rapport de pressions unitaire, et justifie la faveur quasi généralisée des compresseurs axiaux, sauf pour les puissances faibles. En outre, au passif du compresseur centrifuge, il faut mettre son grand diamètre qui accroît l'encombrement du réacteur.

2.2.3. Turbines. — On ne traitera que les turbines axiales qui sont pratiquement les seules employées. Du point de vue aérodynamique elles se présentent comme l'inverse des compresseurs axiaux, en ce sens qu'elles comportent des successions d'étages (grille fixe et grille mobile) ayant pour but de transformer la pression des gaz en vitesse avec production d'énergie. Comme pour les compresseurs, on peut représenter un diagramme des vitesses (fig. II-3). La grille fixe reçoit les gaz de combus-

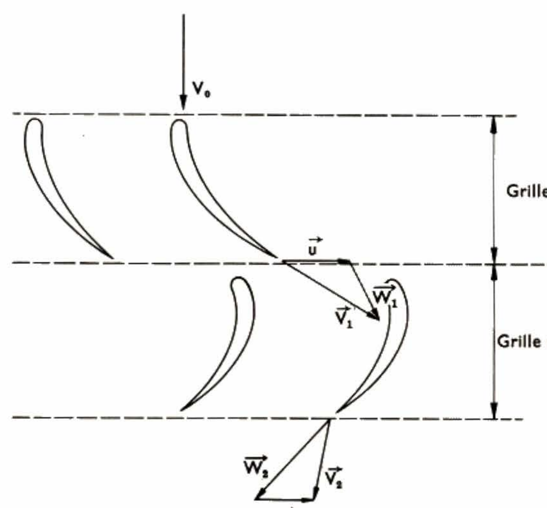


Fig. II-3

tion de vitesse absolue $\vec{V_0}$ et les dévie ; leur vitesse prend une valeur $\vec{V_1}$ qui constitue la vitesse d'arrivée sur la roue mobile. Par composition avec la vitesse de rotation $\vec{u}$ de celle-ci on obtient la vitesse relative $\vec{W_1}$. Après traversée de la grille mobile, cette vitesse est devenue $\vec{W_2}$ qui correspond à une vitesse absolue $\vec{V_2}$ sensiblement axiale. L'écoulement de fluide s'écarte de l'axe à la traversée de la grille fixe puis y est ramené par la grille mobile ; il faut d'ailleurs remarquer que les déviations sont beaucoup plus importantes que celles qui se produisent dans des grilles de compresseur.

De plus, et cela s'applique aussi bien aux étages du compresseur que de la turbine, du fait de la grande vitesse de rotation, l'ensemble compresseur-turbine est soumis à des accélérations très intenses du fait de l'inertie centrifuge ; selon les performances des moteurs, à la périphérie des aubes, ces accélérations sont comprises entre 25 000 et 80 000 fois l'accélération de la pesanteur.

2.2.4. Tuyère d'éjection. — Elle a pour rôle d'accélérer les gaz de combustion issus de la turbine jusqu'à ce que la pression statique dans le jet soit égale à la pression atmosphérique externe. Le type le plus simple consiste en un tronc de cône convergent ; le paramètre régissant le fonctionnement des tuyères est le rapport de la pression des gaz de combustion à la sortie de la turbine à la pression dans le plan de sortie de la tuyère. Pour des valeurs de ce rapport de pressions supérieures à deux, il devient nécessaire de remplacer la tuyère convergente par une tuyère conver-

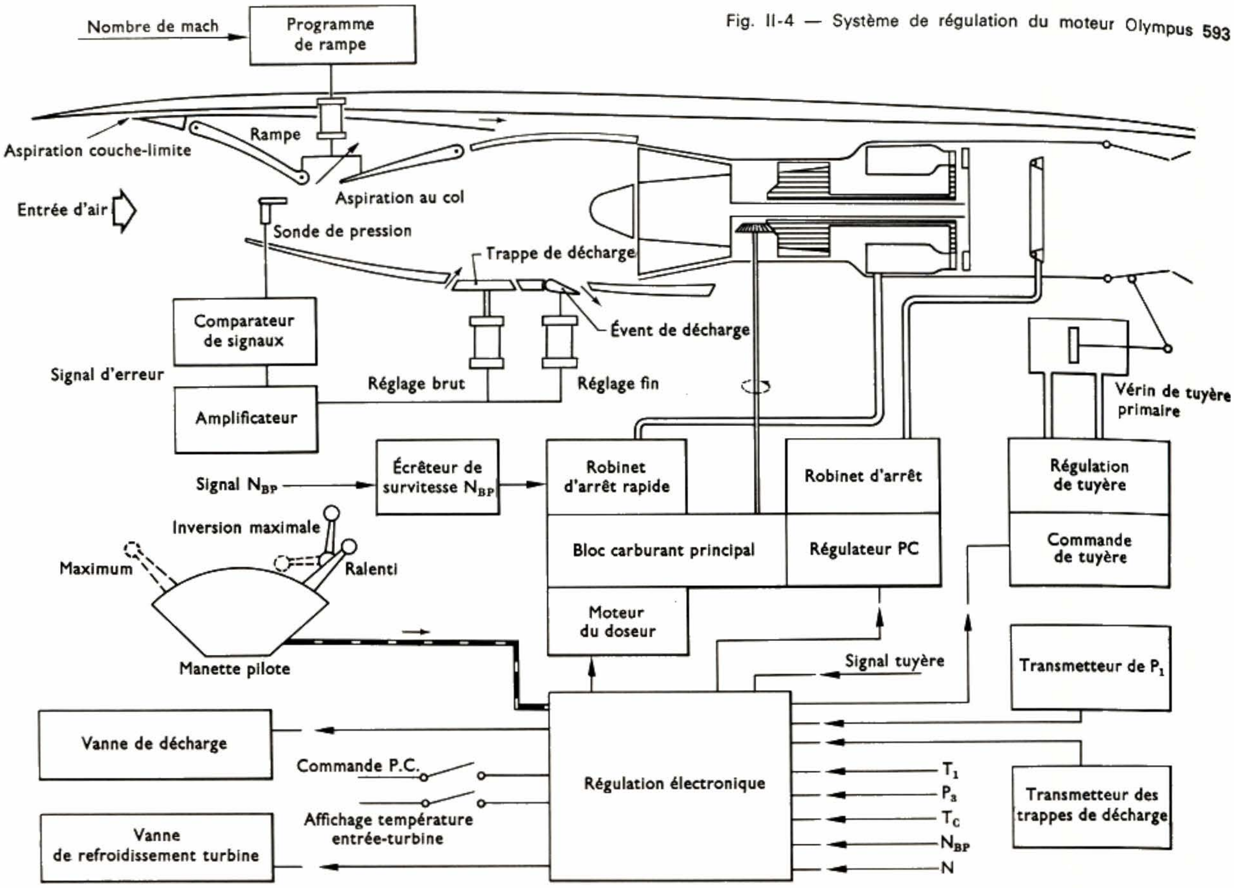


Fig. II-4 — Système de régulation du moteur Olympus 593

gente-divergente présentant un col où la vitesse du flux gazeux est égale à la vitesse du son.

Sur les moteurs pour avions supersoniques, la tuyère est souvent à géométrie variable ; on peut, par exemple, citer la tuyère du moteur Rolls-Royce « Olympus » qui équipe le Concorde (fig. II-4). Dans le cas de ce dernier moteur, l'adaptation de l'entrée d'air à la vitesse de vol est combinée avec celle de la tuyère par un système de régulation (V. § 5).

2.3. Le bruit des turboréacteurs. — L'un des problèmes inhérents à l'utilisation des turboréacteurs, principalement sur les avions de transport civils, est leur niveau de bruit élevé. C'est pourquoi, depuis une dizaine d'années, de gros efforts ont été faits pour réduire ce niveau dans de notables proportions.

Le bruit d'un turboréacteur provient de trois sources (fig. II-5) :

— un bruit de soufflante et de compresseur, qui se propage vers l'avant à travers le canal d'entrée d'air,

— un bruit de turbine qui se propage vers l'arrière à travers le canal d'éjection,

— un bruit de jet.

Les deux premiers sont dus à des interactions entre les aubes des différents étages et l'écoulement interne. Pour les réduire, une première solution consiste à recouvrir les parois internes des canaux d'entrée d'air et d'éjection par des revêtements absorbants du point de vue acoustique. Compte tenu des autres spécifications imposées à ces matériaux (notamment une bonne tenue mécanique en présence d'un écoulement de fluide), les mieux adaptés se sont avérés être des matériaux poreux à base de fibres de verre ou des nids d'abeilles métalliques recouverts d'une couche poreuse (le Rolls Royce R.B. 211 qui équipe le Lockheed 1011 comporte près de 20 m² de tels revêtements sur ses parois internes). Un certain nombre de paramètres géométriques ont également une influence sur la réduction de ces bruits internes, tels l'espacement entre les aubages fixes et mobiles, le nombre d'aubes par étage, le calage de ces aubes.

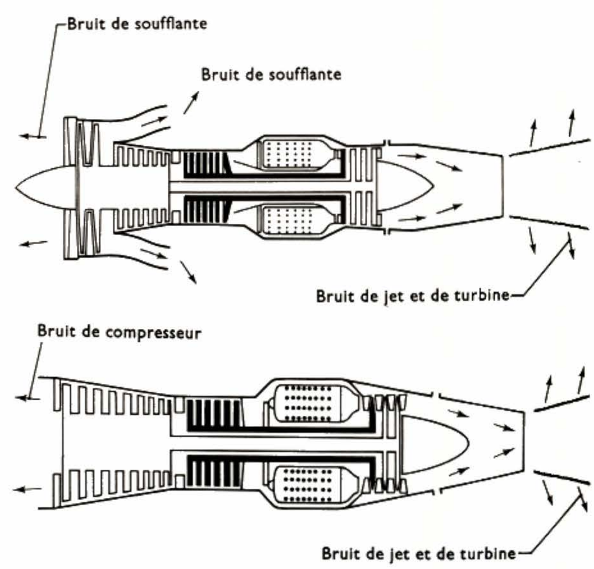


Fig. II-5 — Sources de bruit

Le bruit de jet est dû au mélange des gaz de combustion et de l'air ambiant. Son intensité est proportionnelle à la huitième puissance de la vitesse d'éjection des gaz, toutes choses égales par ailleurs. C'est la raison pour laquelle les turboréacteurs à double flux, où la vitesse d'éjection est réduite par suite du mélange du flux chaud et du flux froid, ont un niveau de bruit inférieur à celui des turboréacteurs monoflux et, a fortiori, des réacteurs à postcombustion. Néanmoins, pour les moteurs destinés à équiper les avions civils, il est nécessaire d'incorporer à la tuyère d'éjection des dispositifs de silencieux. Ceux-ci peuvent appartenir à plusieurs types ; les plus courants sont les silencieux à cannelures recouvrant les parois de la tuyère. Plus récem-

ment sont apparus des silencieux à trompe, utilisant l'entraînement d'une masse d'air qui vient se mélanger au jet direct sur le pourtour de la tuyère, reprenant l'un des aspects des turboréacteurs à double flux.

Depuis quelques années, la NASA a mis à l'étude un programme de turboréacteur silencieux dont l'objectif est d'aboutir à un niveau de bruit inférieur de 15 à 20 dB à celui des turboréacteurs équipant la première génération d'avions de transport à réaction. Les recherches ont conduit à un double flux de taux de dilution égal à cinq et utilisant une soufflante monoétage dont les caractéristiques géométriques ont été particulièrement étudiées.

En ce qui concerne les moteurs d'avions supersoniques, le bruit le plus important est le bruit de jet. Pour les avions de transport supersoniques, il est impératif de le réduire fortement lors du décollage et de l'approche à l'atterrissage. Une première solution consiste à utiliser une tuyère à géométrie variable dont on accroît au maximum la section de sortie. Pour obtenir de meilleurs résultats il est nécessaire d'intégrer à cette tuyère des silencieux. C'est ainsi que la S.N.E.C.M.A. a développé pour le moteur « Olympus » un système de silencieux à pelles consistant en un ensemble de plaques que l'on introduit dans le jet parallèlement à sa direction ; ces plaques (fig. II-6) sont escamotables en vol de croisière, ce qui évite toute pénalisation du point de vue

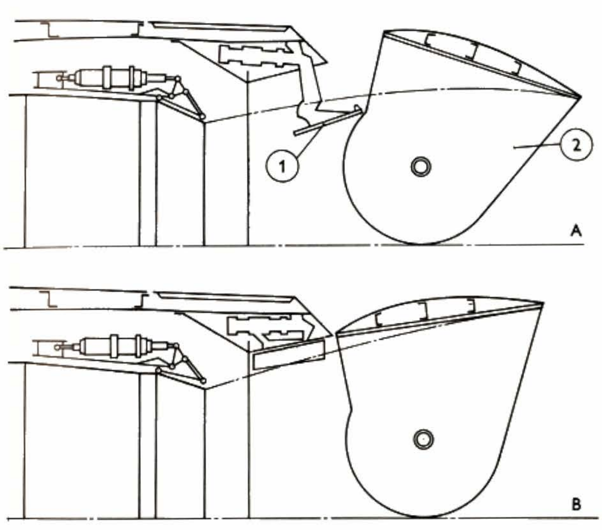


Fig. II-6 — Principe du silencieux à pelles étudié pour le moteur « Olympus ». A. Position sortie. B. Position rentrée. 1. Pelle. 2. Inverseur de poussée

de la poussée. Elles prélèvent une partie des gaz de combustion à température élevée pour les éjecter dans l'espace périphérique en provoquant, en outre, un entraînement d'air additionnel. L'atténuation du bruit est ainsi due à une modification de la structure aérodynamique du jet. Il est à signaler qu'un dispositif du même genre a été envisagé pour les moteurs Pratt et Whitney JT8-D du court-courrier Mercure. En ce qui concerne le Mercure, on doit encore ajouter que les parois de la tuyère ont été revêtues intérieurement par un capitonnage de nids d'abeilles. Un dernier problème posé par les silencieux de tuyères est de les rendre compatibles avec les systèmes d'inversion de poussée également intégrés dans la tuyère. De ce point de vue le dispositif à pelles est tout à fait satisfaisant.

2.4. La régulation des turboréacteurs. — L'optimisation des conditions de fonctionnement des turboréacteurs en fonction de la vitesse de vol nécessite un système de régulation complexe qui doit prendre en considération de nombreux paramètres, tels que débit de carburant, température d'entrée de la turbine, température d'entrée du compresseur, pressions diverses, etc.

Pendant longtemps, les systèmes de régulation ont été de type hydromécanique. Depuis quelques années cependant, les performances demandées devenant de plus en plus poussées, il a fallu faire appel à l'électronique. Celle-ci permet de mesurer certains paramètres (comme les températures) beaucoup plus facilement qu'avec des moyens mécaniques, d'amplifier les faibles mesures, de transmettre les indications à distance, d'effectuer les calculs de régulation dans de petits ordinateurs intégrés aux systèmes, donc d'automatiser la régulation. De plus, elle conduit à un poids et à un volume plus réduits que les solutions antérieures et facilite l'entretien.

À titre d'exemple, on décrira le dispositif de régulation du moteur « Olympus » qui équipe le Concorde. Sa fonction principale est de coordonner le débit de carburant avec la valeur optimale du rapport de détente de la tuyère, lui-même fonction des conditions de vol. Pour cela, il agit directement sur la section de sortie de la tuyère. La température en amont de la turbine influence également le débit de carburant, et doit être maintenue en dessous d'une valeur compatible avec la tenue mécanique des aubages de turbine.

En réalité, c'est la température des gaz d'éjection qui est surveillée car elle dépend directement de la température devant turbine. Deux autres paramètres doivent encore être maintenus dans des limites pré-établies en fonction du régime de vol : ce sont les vitesses de rotation des ensembles basse pression et haute pression. De plus, le dispositif de régulation est également chargé du contrôle de l'entrée d'air à géométrie variable en fonction de la vitesse de vol ; des prises de pression permettent de mesurer la pression statique et la pression dynamique à l'extrémité de la rampe mobile ; les indications obtenues commandent la position de la rampe et l'ouverture des clapets de décharge par l'intermédiaire d'un système électrohydraulique.

Il faut encore mentionner que certains systèmes de régulation incorporent des ensembles de détection automatique des pannes, ce qui accroît la fiabilité des moteurs dans des proportions importantes.

3. LE STATORÉACTEUR

Le statoréacteur est un propulseur fondé sur un cycle thermodynamique très voisin de celui du turboréacteur, à la différence près que la compression est entièrement assurée par transformation, dans l'entrée d'air, de l'énergie cinétique de l'air absorbé. On obtient ainsi l'air sous pression et cela permet de supprimer le compresseur et, par voie de conséquence, la turbine.

Un statoréacteur se compose donc essentiellement :

— d'une entrée d'air,

— d'une chambre de combustion haute pression,

— d'une tuyère d'éjection des gaz brûlés.

Si l'on revient sur la formule donnant la poussée d'un propulseur, $F = Q\ (V_1 - V_0)$, on voit que pour un statoréacteur, le débit d'air absorbé étant directement proportionnel à la vitesse de vol, il en ira de même de la poussée. Un véhicule propulsé uniquement par un statoréacteur ne peut donc décoller par ses propres moyens, puisque la poussée au point fixe est nulle. À ce premier inconvénient, s'ajoute celui d'une consommation spécifique élevée. Cependant, par rapport au turboréacteur, le statoréacteur fournit une poussée beaucoup plus élevée aux grandes vitesses et est libéré de la contrainte liée à la résistance thermique des ailettes de turbine. De plus, dernier point à porter au crédit de ce type de propulseur, il est remarquablement léger, du fait même de sa simplicité.

Si les premiers avions à statoréacteurs étaient largués en vol à partir d'un avion porteur, comme ce fut le cas du Leduc 010, il apparut vite que l'avenir de ce mode de propulsion était lié à une association avec un turboréacteur, et c'est ainsi qu'ont été développées les études sur le combiné turbo-statoréacteur. En effet, la juxtaposition pure et simple des deux propulseurs, chacun d'eux fonctionnant indépendamment de l'autre dans un domaine particulier, le turboréacteur en subsonique et le statoréacteur en supersonique, aurait conduit à un poids prohibitif. Le combiné turbo-statoréacteur associe donc les deux propulseurs en un seul, l'entrée d'air et la tuyère d'éjection étant communes. Dans cette formule, la chambre de combustion du statoréacteur entoure complètement le

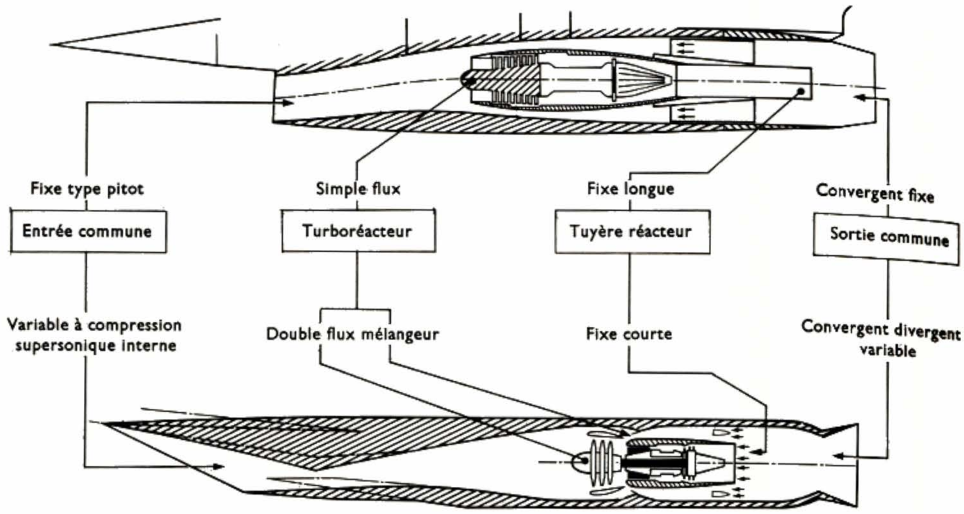


Fig. II-7

Combiné à turboréacteur à double flux du type « Griffon » (1954) et combiné pour vitesses de vol élevées

turboréacteur (fig. II-7). En France, les premières études furent effectuées par Nord-Aviation et conduisirent à la réalisation de l'avion expérimental « Griffon » qui, dès 1959, atteignit Mach 2,2 et battit le record de vitesse en circuit fermé sur 100 km. Il comportait un turboréacteur S.N.E.C.M.A. Atar 101 E3, qui, à Mach 1, fournissait environ la moitié de la poussée totale, alors qu'à Mach 2, le statoréacteur fournissait, à lui seul, 80 % de cette poussée.

Avec l'évolution vers des vitesses de vol plus grandes, la structure du combiné turbo-statoréacteur s'est modifiée. Pour assurer la meilleure adaptation possible à tous les régimes de vol, il a fallu rendre l'entrée d'air et la tuyère d'éjection à géométrie variable. De plus, le turboréacteur est un double flux dont le flux secondaire débouche dans le canal du statoréacteur, en amont de la chambre de combustion de ce dernier. La figure II-7 représente schématiquement ce nouveau système propulsif, qui fonctionne correctement jusqu'à des nombres de Mach supérieurs à 4. Selon que l'on arrête complètement ou que l'on fait fonctionner à régime réduit l'un ou l'autre des deux propulseurs, on parvient à couvrir toute la gamme des vitesses de vol depuis le décollage jusqu'à la vitesse maximale. En vol transsonique, le moteur fonctionne comme un turboréacteur à double flux. Aux vitesses supersoniques modérées, il fonctionne en combiné. Lorsque l'on atteint les limites de fonctionnement du turboréacteur, le régime est celui d'un statoréacteur pur.

L'étude de prises d'air transformant en pression l'énergie cinétique d'un écoulement supersonique avec le meilleur rendement a conduit au choix de prises à compression supersonique interne dans lesquelles la compression s'obtient par le biais d'une ou plusieurs ondes de choc. Jusqu'à des vitesses voisines de Mach 4, ces ondes de choc permettent de ramener à une valeur subsonique la vitesse de l'écoulement qui pénètre dans la chambre de combustion. Dans ces conditions, la flamme peut être relativement bien stabilisée, soit par le moyen d'accroche-flammes, sorte d'obstacles placés transversalement dans le jet, soit en envoyant dans la chambre un jet secondaire d'air frais à contre-courant des gaz de combustion.

Lorsque la vitesse de vol dépasse Mach 4, il n'est plus possible de comprimer suffisamment le flux d'air incident dans l'entrée d'air pour que la vitesse d'écoulement à l'entrée de la chambre ait une valeur inférieure à la vitesse du son. En effet, d'une part, la température augmente parallèlement à la pression et peut atteindre des valeurs prohibitives pour la tenue des matériaux constituant la chambre de combustion et, d'autre part, l'optimisation des conditions de fonctionnement sur une large gamme de nombres de Mach entraînerait des variations considérables de la géométrie de l'entrée d'air et de la tuyère. Force est alors d'accepter que la combustion s'effectue en écoulement supersonique, mais la stabilité de celle-ci est plus délicate à assurer. En France, l'O.N.E.R.A. a mené des études dans ce domaine sur un statoréacteur à géométrie fixe, et en utilisant de l'hydrogène comme combustible. Des essais ont été effectués à Mach 6 dans la soufflerie supersonique de Modane et se sont avérés très satisfaisants. De même aux États-Unis d'Amérique, la NASA développe des recherches analogues, notamment pour la prochaine génération de véhicules aérospatiaux et pour l'avion de transport hypersonique de la décennie 1980. La particularité fondamentale de la technique O.N.E.R.A. réside dans la simultanéité des phases de combustion et de détente, la répartition des points d'injection du combustible pouvant varier selon le régime de vol pour réaliser l'adaptation du statoréacteur.

Un paramètre intéressant pour comparer les performances des propulseurs est l'impulsion spécifique que l'on peut définir comme l'inverse de la consommation spécifique et qui s'exprime donc en décanewtons-heure par kilogramme :

$$I_s = \frac{1}{c_s}$$

Cette notion d'impulsion spécifique prend encore plus d'importance dans le cas des moteurs-fusées. Ces derniers devant emporter à la fois leur carburant et leur comburant, la consommation spécifique est beaucoup plus élevée, et partant, l'impulsion spécifique beaucoup plus faible. La figure II-8 compare différents types de statoréacteurs sur une gamme de nombres de Mach allant jusqu'à 10. On voit que le passage du kérosène à l'hydrogène liquide comme carburant permet de presque doubler la valeur de l'impulsion spécifique.

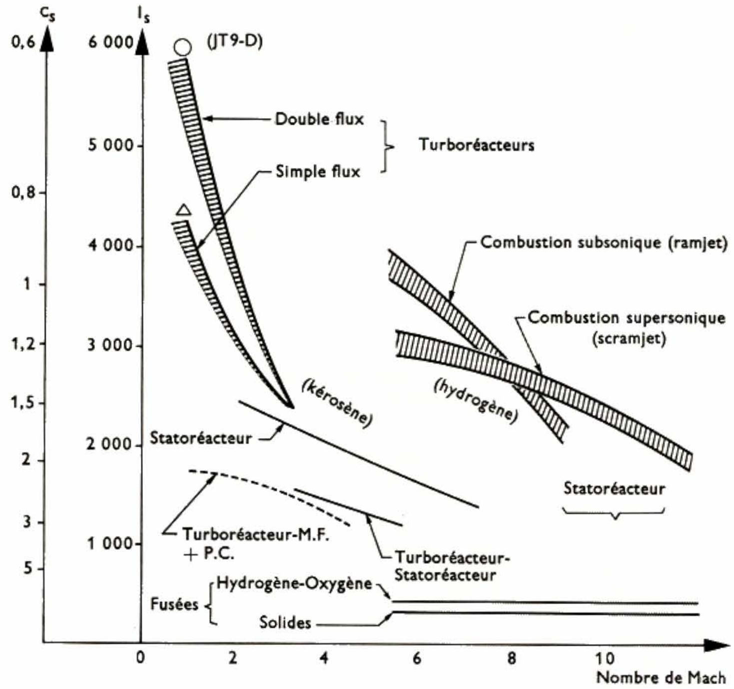
Une autre voie de développement du statoréacteur a fait l'objet de quelques études aux États-Unis d'Amérique : c'est le stato-fusée. On peut le considérer comme un statoréacteur dans l'entrée d'air duquel est monté un moteur-fusée. L'éjection des gaz de combustion du moteur-fusée provoque, par effet de trompe à air, un accroissement du débit d'air entrant dans le statoréacteur ; cet air et les gaz de combustion du moteur-fusée viennent alors se mélanger dans la chambre de combustion du statoréacteur où s'effectue la combustion proprement dite. Toutefois, cette formule semble pour le moment en sommeil.

Sur le plan technologique, si les principaux problèmes posés par la réalisation de statoréacteurs à combustion supersonique concernent la régulation nécessaire pour optimiser les performances, il faut également mentionner les problèmes d'ordre thermique, étant donné les températures atteintes dans la chambre de combustion (surtout avec l'utilisation de l'hydrogène liquide). De ce fait, la structure doit faire un large appel aux alliages réfractaires du type René 41 (V. chap. 4).

En dehors des avions expérimentaux précédemment cités, les applications des statoréacteurs ont essentiellement porté sur les missiles et sur quelques avions sans pilote. C'est ainsi qu'on peut citer l'engin-cible « Véga » conçu par Nord-Aviation, qui peut voler à des vitesses correspondant à Mach 4, et la fusée expérimentale « Stataltex » de l'O.N.E.R.A. qui a atteint Mach 5.

Fig. II-8

Impulsion spécifique I_s et consommation spécifique c_s des différents propulseurs



Actuellement, l'O.N.E.R.A. développe un statoréacteur destiné à un missile sol-air hypersonique qui pourrait être opérationnel dans la décennie des années 80. Ce statoréacteur présente la particularité d'avoir quatre entrées d'air bidimensionnelles réparties sur le pourtour de l'engin et qui servent de voilure cruciforme en sorte que propulsion et sustentation se trouvent complètement intégrées.

Des essais ont eu lieu sur une maquette à échelle 1/2 dans la soufflerie de Modane jusqu'à une vitesse correspondant à Mach 6. Ils ont montré que, grâce au nombre des entrées d'air, le statoréacteur était convenablement alimenté en air dans toutes les configurations d'incidence.

4. LE MOTEUR-FUSÉE

Dans ce cas, il n'y a pas d'aspiration d'air extérieur, puisque le comburant nécessaire à la combustion est emporté à bord du véhicule propulsé.

L'application du théorème des quantités de mouvement donne alors comme expression de la poussée:

$$F = Q \cdot V_e$$

V_e étant la vitesse d'éjection des gaz. Du moins, cette expression n'est-elle rigoureusement exacte que si la détente des gaz de combustion est suffisamment poussée pour que la pression p_e dans le plan de sortie de la tuyère soit égale à la pression extérieure ambiante p_a. Dans le cas où la détente est insuffisante ($p_e > p_a$), il faut ajouter un terme correctif, et la formule s'écrit:

$$F = Q \cdot V_e + (p_e - p_a)\, S_e \qquad (1)$$

(si l'on appelle S_e la section de sortie de la tuyère). Lorsque $p_e = p_a$, la tuyère est dite adaptée, et l'on a:

$$F = QV'_e \ (2) \ \text{avec} \ V'_e > V_e$$

La vitesse d'éjection des gaz est alors maximale, toutes choses égales par ailleurs.

La formule (1) montre immédiatement que, pour une fusée de forme déterminée, la poussée est plus grande dans le vide puisque la valeur de p_a est alors égale à zéro.

Pour une valeur déterminée du rapport de détente, c'est-à-dire du rapport de la section de sortie de la tuyère à la section du col, la vitesse d'éjection des gaz de combustion est proportionnelle à la racine carrée de la température dans la chambre de combustion. Il y a donc intérêt à faire appel à des réactions chimiques impliquant une température élevée.

En ce qui concerne la puissance propulsive, elle est donnée par la même relation que celle d'un turboréacteur:

$$W_p = F \cdot V_0 = Q\, V_e\, V_0$$

La puissance perdue est celle du jet: elle correspond à l'énergie cinétique des molécules de fluide contenues dans ce dernier. Elle a pour valeur: $\frac{Q}{2}(V_e - V_0)^2$ car la vitesse absolue des gaz d'éjection est $(V_e - V_0)$. La puissance totale mise en jeu est la somme de la puissance propulsive et de la puissance perdue, soit:

$$W = QV_eV_0 + \frac{Q}{2}(V_e - V_0)^2$$

$$= \frac{Q}{2}(V_e^2 + V_0^2)$$

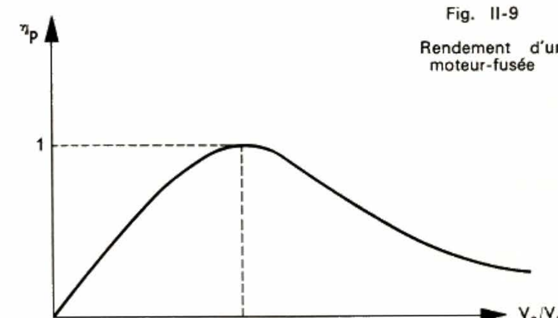
Par suite, le rendement de propulsion a pour valeur:

$$\eta_p = \frac{2\, V_e\, V_0}{(V_e^2 + V_0^2)}$$

La figure II-9 donne l'évolution de ce rendement qui est maximal et égal à 1 pour $V_e = V_0$.

Fig. II-9

Rendement d'un moteur-fusée



Comme pour les turboréacteurs, une tuyère de forme déterminée n'est adaptée que pour une altitude bien définie, les conditions de fonctionnement du moteur-fusée étant données par ailleurs. Si l'on veut que la tuyère soit adaptée à différentes altitudes, il faut pouvoir modifier la géométrie de la tuyère; c'est ainsi qu'est apparue la technique de la tuyère extensible, qui en est encore pour le moment au stade expérimental. On coupe transversalement la tuyère en deux parties: la partie antérieure est fixée à la chambre de combustion alors que la partie postérieure peut coulisser d'avant en arrière. Aux basses altitudes, ce dernier élément se trouve positionné concentriquement au précédent; au-delà d'une certaine altitude, il vient se placer dans le prolongement du premier élément. On obtient ainsi

une tuyère à deux configurations, parfaitement adaptée à deux altitudes.

La technologie des moteurs-fusées est étudiée dans le chapitre consacré aux lanceurs et véhicules spatiaux (V. chap. 9). Ceux-ci constituent en effet un des domaines principaux d'application de ce type de moteurs. Leurs caractéristiques particulières, à savoir une technologie relativement simple, de grandes facilités de stockage pour les propulseurs à poudre, la possibilité d'obtenir des accélérations élevées, en font des propulseurs de choix pour toutes les catégories de missiles. Il faut aussi mentionner leur utilisation comme fusées d'appoint pour avions militaires et fusées de décollage pour avions lourdement chargés.

5. ENTRÉES D'AIR ET TUYÈRES DE SORTIE DES RÉACTEURS ET DES FUSÉES

L'un des aspects particuliers du vol à grande vitesse est le rôle de plus en plus important des prises d'air et des tuyères de sorties. Dans le cas des avions subsoniques, équipés de turboréacteurs double flux à soufflantes de grands diamètres, c'est principalement un problème de traînée qui apparaît, lié à la dimension du fuseau-moteur et à la proximité des irréversibilités transsoniques. En vol supersonique, c'est toute la poussée et l'efficacité de la propulsion qui sont en jeu.

Quelques données générales relatives à ces problèmes seront d'abord précisées; elles permettront ensuite de suivre l'évolution des formes et le choix des solutions retenues.

5.1. Caractéristiques générales et dimensionnement

5.1.1. Poussées du moteur et efficacité de l'entrée d'air. — Rappelons que la poussée résulte des pressions qui s'exercent sur les parois internes de la prise d'air, sur les aubages du moteur et sur les parois internes de la tuyère (fig. II-10). Dans le vol à grande vitesse, et notamment en supersonique, l'écoulement (par rapport à l'avion) est ralenti dans la prise d'air depuis une vitesse amont égale à la vitesse du vol jusqu'à une vitesse interne très subsonique. Il en résulte un niveau de pression interne élevé par rapport à la pression externe p_0; la part de la poussée qui s'exerce sur la prise d'air croît avec le nombre de Mach du vol.

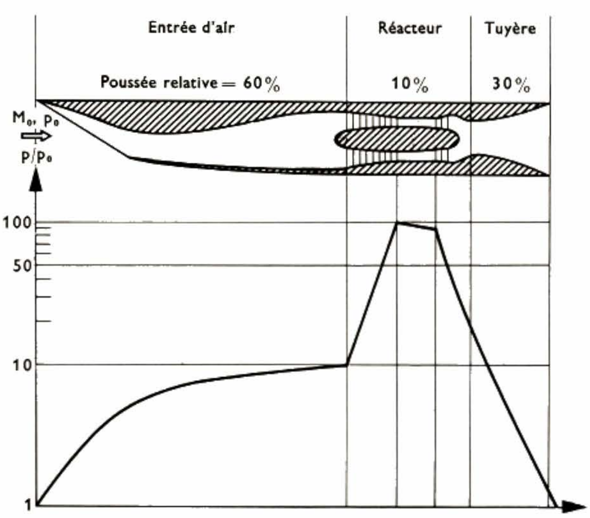


Fig. II-10 — Pressions internes à $M_0 = 2,2$

Les pressions à la sortie du moteur suivent les pressions d'entrées. Dans la tuyère divergente, en aval du col sonique du moteur, l'écoulement est supersonique et la pression est décroissante, mais elle reste supérieure à la pression externe jusque vers la sortie. Cela explique la poussée de tuyère qui se manifeste. À Mach 2,2, par exemple, la prise d'air comprime autant l'écoulement que le compresseur du moteur, et la tuyère le détend autant que la turbine. La poussée interne est exercée pour 60 % par la prise d'air, pour 10 % seulement par le moteur proprement dit, et pour 30 % par la tuyère. En hypersonique, la prise d'air peut assurer à elle seule toute la compression : le moteur est réduit à sa chambre de combustion, selon le principe du *statoréacteur;* cette solution est utilisée dès Mach 2 pour certains engins.

L'obtention de pressions internes élevées conditionne la poussée et améliore le rendement (consommation de carburant à poussée déterminée). La pression est maximale quand le ralentissement de l'écoulement interne s'effectue de façon réversible (isentropique).

L'*efficacité de la prise d'air* est le rapport de la pression obtenue, à la pression que donnerait une compression réversible au même nombre de Mach terminal (ou encore, identiquement, le rapport de la « pression d'arrêt » obtenue à la « pression d'arrêt isentropique de l'écoulement relatif amont »).

Les phénomènes irréversibles qui dégradent l'efficacité sont les ondes de choc, les couches limites qui résultent du frottement aux parois, et les sillages tourbillonnaires émis par les zones décollées. Ces dernières apparaissent lorsqu'une croissance trop rapide de la pression le long d'une paroi refoule la couche limite vers l'amont; l'écoulement principal forme alors un jet séparé de la paroi par un noyau tourbillonnaire et par l'écoulement de retour (V. fig. II-15, par exemple).

Notons que ces phénomènes irréversibles sont du même genre que ceux qui se produisent à l'extérieur du conduit-moteur et engendrent la traînée des nacelles et de l'avion d'une façon générale.

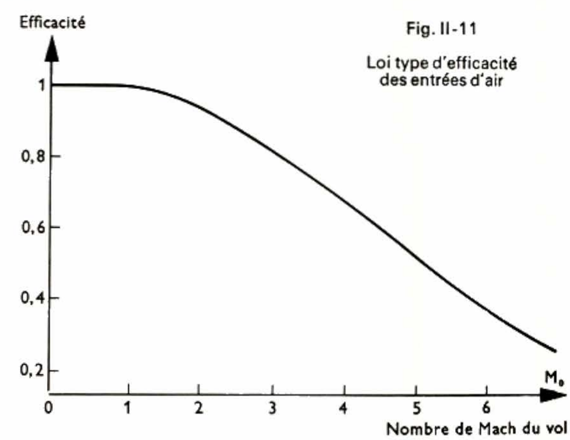


Fig. II-11

Loi type d'efficacité des entrées d'air

La recherche d'une grande efficacité est l'un des premiers objectifs de l'étude d'une prise d'air. Une loi type de variation de l'efficacité en fonction du nombre de Mach (pour des prises d'air très perfectionnées) est représentée sur la figure II-11.

5.1.2. Section débitante amont et section critique d'entrée-moteur (fig. II-12). — Dans le plan d'entrée A_2 du moteur, l'équilibre interne du moteur et sa régulation imposent un certain nombre de Mach M_2, fonction du régime du moteur et des conditions extérieures.

Connaissant A_2, M_2, et l'efficacité, il est aisé de calculer, par la relation de conservation du débit en masse, en écoulement adiabatique, la section A_0 du tube de courant qui alimente le moteur depuis l'infini amont. La rapport $\frac{A_0}{A_2}$ correspondant est représenté figure II-13. Le nombre de Mach M_2 variant peu avec M_0, la variation de A_0 reflète celle d'un tube de courant donné en A_2. Au point fixe, l'air s'engouffre de toutes parts dans l'entrée (A_0 infinie) ; A_0 décroît en subsonique et est égale à A_2 vers $M_0 = 0,5$ ($M_0 = M_2$). Elle passe par un minimum à $M_0 = 1$, puis croît ensuite constamment, devenant supérieure à A_2 vers $M_0 = 2$. L'évolution de A_0 interviendra directement dans le problème d'adaptation des entrées d'air.

Une autre section à considérer sera la section minimale par laquelle le débit d'air alimentant le moteur est suscep-

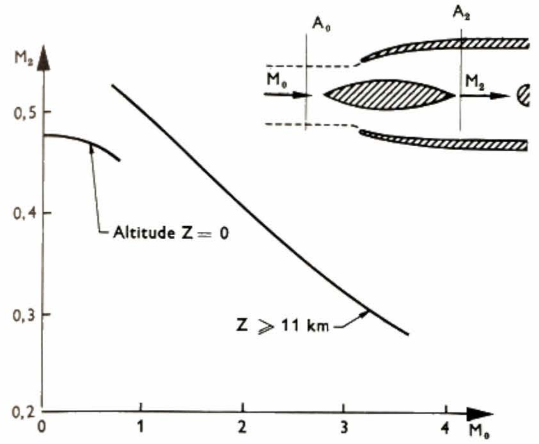


Fig. II-12 — Nombre de Mach M_2 à l'entrée du réacteur en fonction du nombre de Mach M_0

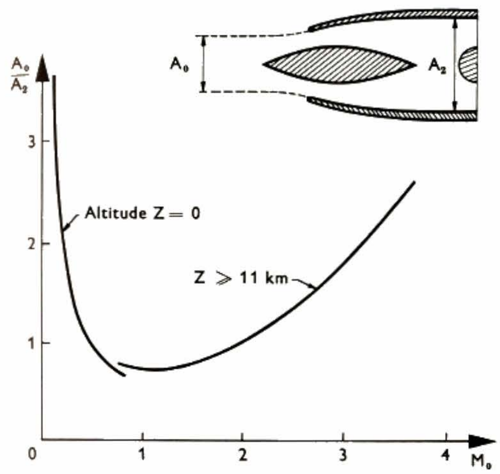


Fig. II-13 — Section du tube de courant capté A_0 rapportée à la section d'entrée A_2 du réacteur en fonction de M_0

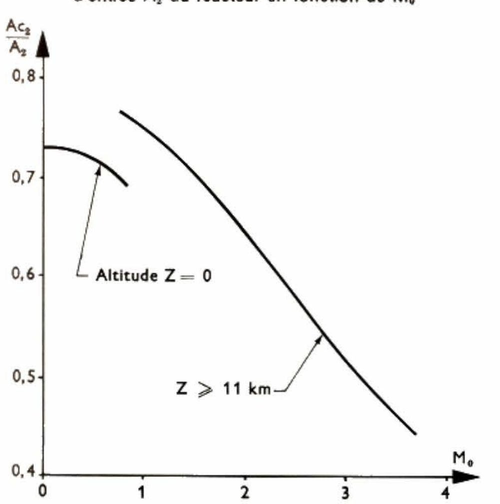


Fig. II-14 — Variation de la section critique du débit d'entrée A_{c2} rapportée à la section d'entrée A_2 du réacteur en fonction de M_0

tible de passer, section « critique » dans laquelle l'écoulement serait sonique. Si l'on appelle A_{c2} cette section, le rapport $\dfrac{A_{c2}}{A_2}$ est une fonction de M_0 dont la représentation graphique est donnée sur la figure II-14.

5.1.3. Dimensionnement de l'entrée d'air

a) *Entrée d'air supersonique.* — Les bords d'attaque sont tranchants ; une lèvre arrondie conduirait nécessairement à une onde de choc détachée et, de ce fait, à une traînée d'onde parasite.

Une propriété de l'écoulement supersonique est que le débit maximal que peut capter une entrée d'air adaptée, est celui défini par le tube de courant amont qui s'appuie sur les bords d'attaque de l'entrée d'air. Soit A_1 l'aire maximale de ce tube de courant (V. fig. II-25). Si A_1 est supérieure à la section A_0 du débit demandé par le moteur, une partie de l'écoulement incident devra être déviée hors de l'entrée d'air. En supersonique, cette déviation entraîne obligatoirement l'apparition d'une onde de choc, et donc d'une traînée. Si A_1 est inférieure à A_0, le débit d'adaptation ne pouvant être capté, la manche à air passe en dépression par l'intermédiaire d'une onde de choc interne, et l'efficacité est diminuée (régime « supercritique » ; V. fig. II-32). En conclusion, la section frontale A_1 d'une prise d'air supersonique adaptée doit être égale à la section A_0 (la valeur de cette dernière rapportée à A_2, a été représentée figure II-13).

b) *Entrée d'air subsonique.* — L'entrée est alors caractérisée par un bord d'attaque arrondi dont le dessin résulte de considérations qui vont être développées à présent. À un nombre de Mach faible (décollage), A_0 étant très grand (infini au point fixe), l'écoulement contourne le bord d'attaque de l'extérieur vers l'intérieur. Un tel contournement est caractérisé par une survitesse au bord d'attaque, suivie d'une compression interne immédiatement en aval ; celle-ci risque de produire un décollement (fig. II-15).

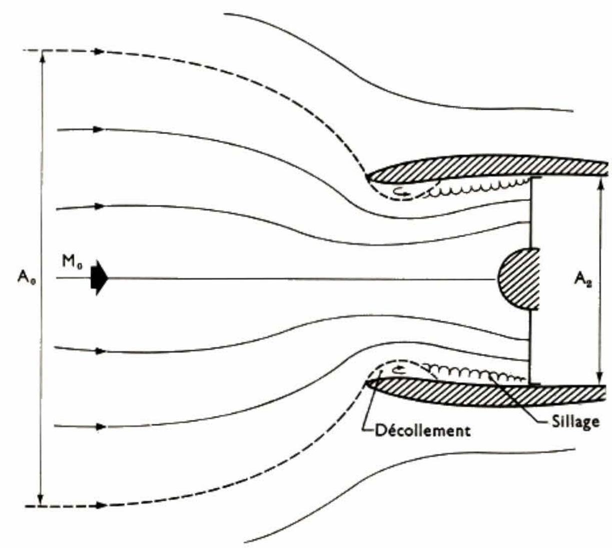


Fig. II-15 — Basse vitesse ; lèvre trop mince

Pour éviter cela, on est conduit, à donner au bord d'attaque un rayon aussi grand que possible vers l'intérieur. On est limité en cela, d'une part, par la section minimale de passage A_{c2} qu'il faut respecter à l'entrée (sinon, le débit est bloqué par un col sonique, avec détente supersonique interne en aval du col, et onde de choc, d'où perte d'efficacité) et, d'autre part, par la traînée en vol de croisière qui impose de limiter l'épaisseur de la lèvre d'entrée. En effet, à vitesse subsonique élevée, A_0 est inférieure à A_2 (V. fig. II-13). Si la lèvre est trop épaisse, l'écoulement la contourne vers l'extérieur cette fois (V. fig. II-16). La survitesse au bord d'attaque, qui résulte de ce contournement, est très vite supersonique, et la recompression qui fait suite s'effectue généralement par une onde de choc et une traînée associée (traînée d'onde et traînée de décollement par interaction onde de choc-couche limite).

En définitive, il faut rechercher un compromis entre basse vitesse et vitesse de croisière (nombre de Mach M_0). Jusque vers $M_0 = 0{,}85$, un tel compromis est possible. Au-delà, les bords d'attaque acceptables deviennent trop minces (ils sont aigus en supersonique) et il faut soit admettre une perte de performance au point fixe et au début du roulement, par exemple, soit munir la prise d'air d'entrées auxiliaires pour le décollage.

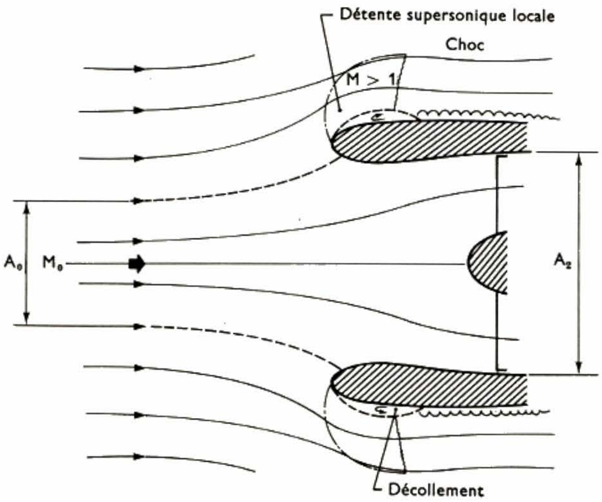


Fig. II-16 — Vitesse subsonique élevée ; lèvre trop épaisse

c) *Entrées auxiliaires pour le décollage.* — À basse vitesse, elles améliorent le fonctionnement des entrées à lèvres minces. Dans la manche à air, en aval de l'entrée, l'ouverture de passages bien profilés pour l'admission d'air vers l'intérieur, permet de réduire le débit demandé à l'entrée principale, et d'atténuer d'autant l'importance et l'effet des décollements dus au contournement des lèvres effilées du contour d'entrée (V. fig. II-26, par exemple).

d) *Dimensionnement de la tuyère de sortie.* — Le jet d'un réacteur est caractérisé par la section A_{cj} du col de la tuyère qui commande l'équilibre interne du moteur (et qui est, soit fixe, soit réglable par le système de régulation du moteur), et par la section A_{j0} que prend le tube de courant sortant, lorsqu'il se met en équilibre de pression avec l'écoulement externe à l'infini aval. Une évolution typique de ces sections, rapportées à la même section A_2 que précédemment, est représentée figure II-17 (il ne s'agit ici que d'une indication, les valeurs absolues pouvant être assez différentes d'un moteur à l'autre et supérieures de 30 %, par exemple, dans le cas d'une réchauffe).

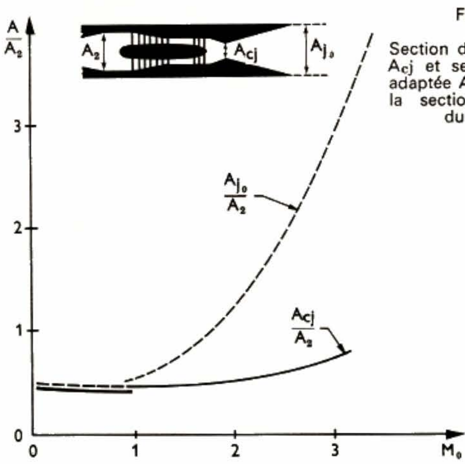


Fig. II-17

Section de col de tuyère Acj et section de sortie adaptée Aj₀, rapportées à la section d'entrée A₂ du réacteur

L'adaptation consiste à donner à la section de sortie A_j de la tuyère une valeur voisine de A_{j0} : si A_j est inférieure à A_{j0}, la poussée de la tuyère est amputée de l'élément de poussée qui pourrait s'exercer de A_j à A_{j0}. Si A_j est supérieure à A_{j0}, dans la détente supersonique de A_{j0} à A_j les pressions internes sont inférieures à la pression externe et la traînée de carénage externe, due à l'accroissement de la section de sortie A_j, l'emporte sur la poussée interne absolue de l'élément A_{j0}.

e) *Cas d'un double flux subsonique* (fig. II-18). — Les pressions aux cols soniques de sortie des deux jets sont voisines de la pression ambiante, A_{cj} et A_{j0} sont du même ordre de grandeur et il n'y a pratiquement pas de divergent. Des carénages de *faible courbure* raccordent entre eux le maître-couple du fuseau et les sorties des jets ;

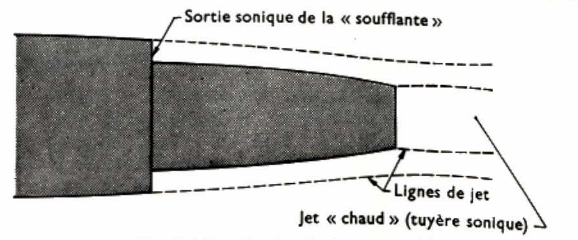


Fig. II-18 — Sorties de fuseau double flux

une évolution très progressive de l'écoulement externe est en effet nécessaire pour éviter des survitesses supersoniques et des ondes de choc. Le positionnement des fuseaux sur l'avion est lui-même étudié pour obtenir une « loi des aires » optimale de l'ensemble.

5.2. Différents types de prises d'air supersoniques et réglages en fonction du nombre de Mach

5.2.1. Entrées d'air Pitot des avions faiblement supersoniques. — Ces entrées d'air se présentent comme une simple ouverture frontale à lèvres minces, suivie d'un divergent raccordant la section d'entrée $A_1 (A_1 = A_0)$ à la section A_2 du moteur. L'écoulement passe du supersonique au subsonique par un choc droit situé en A_1.

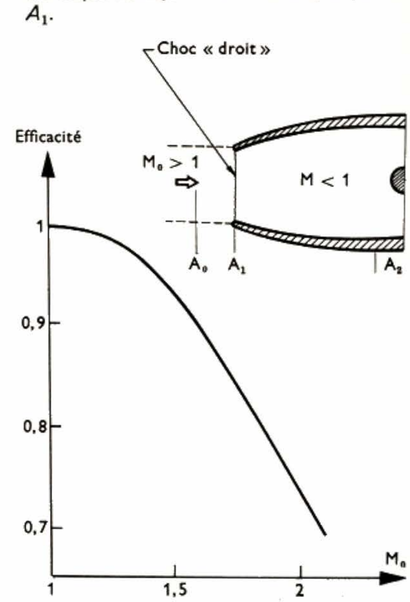


Fig. II-19

Efficacité d'une entrée d'air « Pitot » (choc droit)

Si l'on néglige le frottement interne, l'efficacité est celle qui résulte du choc droit d'entrée (fig. II-19). La rapide décroissance de l'efficacité avec le nombre de Mach limite l'intérêt de ces entrées dès que l'on dépasse $M_0 = 1{,}4$ environ.

5.2.2. Entrées d'air à compression supersonique externe (C.S.E.). — La première solution proposée pour améliorer l'efficacité en supersonique a consisté à placer un corps central à pointe conique émergente au centre d'une carène de révolution (Oswatitsch, 1944). À l'adaptation, cette pointe provoque un choc conique qui s'appuie sur l'entrée de la carène (fig. II-20) ; l'écoulement incident, qui n'est perturbé par la pointe conique qu'en aval du choc attaché à celle-ci, pénètre donc dans la prise d'air sans déviation des lignes de courant qui délimitent le débit capté jusqu'à la carène ($A_0 = A_1$).

L'écoulement autour du cône étant supersonique, mais à un nombre de Mach réduit par la compression conique, le débit capté traverse successivement le choc conique et un choc droit d'*intensité modérée* situé dans la section annulaire d'entrée.

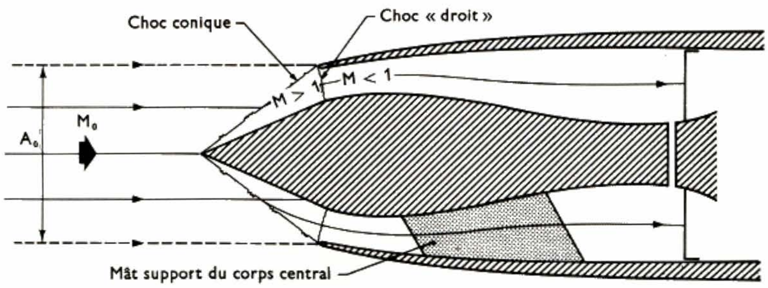


Fig. II-20

Compression supersonique externe à pointe conique

L'efficacité globale de cette configuration est plus élevée que celle d'un Pitot, du fait d'une compression supersonique plus progressive.

Un gain d'efficacité peut encore être obtenu en remplaçant le choc conique par une succession de deux chocs de plus faible intensité, moyennant une pointe émergente plus effilée formant un double cône.

Ce double cône peut à son tour être remplacé par un profil de déviation progressive de l'écoulement vers l'extérieur, dont les ondes focalisent sur le bord de la carène : ainsi, dans des conditions idéales, on obtiendrait une compression sans choc, avec $M = 1$ à l'entrée. Toutefois dans ce cas, l'étude de l'écoulement au voisinage de la carène montre qu'un choc détaché se formerait devant la carène, au lieu de la focalisation ponctuelle supposée. De plus, pour éviter un tel choc, il est nécessaire de donner à la carène une pente initiale élevée, d'où une traînée appréciable. Ce type de compression a donc des limites. Son efficacité maximale est représentée figure II-21. L'efficacité utile, compte tenu d'un compromis nécessaire avec une pente de carène modérée pour réduire la traînée, est un peu inférieure à cette efficacité maximale.

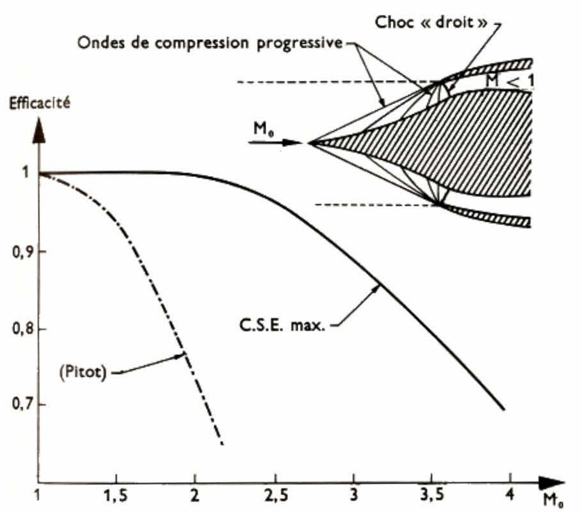


Fig. II-21 — Compression supersonique externe maximale (C.S.E. maximale) ; ondes focalisées

Les versions bidimensionnelles de ces mêmes principes sont les prises d'air à simple dièdre, à double dièdre, à rampe de déviation progressive (fig. II-22). Parmi celles-ci on peut citer la prise d'air à double dièdre, suivie d'une déviation progressive, du « Concorde » (V. fig. II-26).

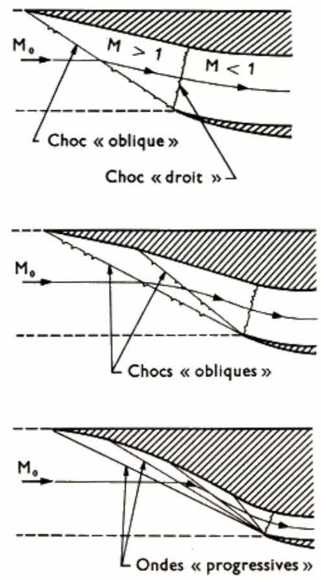


Fig. II-22

C.S.E. à simple dièdre, à double dièdre et à compression progressive focalisée

Les entrées d'air à compression supersonique externe sont particulièrement adaptées aux « Mach » de vol de 1,5 à 2,3 environ. Elles conviennent moins au-delà, du fait de leurs efficacités décroissantes.

5.2.3. Entrées d'air à compression supersonique mixte (C.S.M.). — Ces entrées d'air tiennent leur nom du fait qu'une partie seulement de la compression supersonique s'effectue à l'extérieur de l'entrée : cette compression se poursuit à l'intérieur, jusqu'à un col interne où le nombre de Mach est un peu supérieur à l'unité. L'écoulement passe ensuite en subsonique par un choc de faible intensité (fig. II-23). On reconnaît dans la forme « convergente-divergente » du conduit l'évolution des sections d'un tube de courant lorsque le nombre de Mach décroît du supersonique au subsonique, en passant par $M = 1$ au col.

Les entrées à C.S.M. offrent l'avantage de n'entraîner qu'une très faible perte d'efficacité par chocs. De plus, la traînée externe est très réduite. Cependant, les pertes par frottement interne sont relativement élevées. De ce fait, ces entrées ne deviennent intéressantes qu'au-delà de M supérieur à 2,3 environ. Leur particularité est de présenter un problème d'amorçage qui nécessite un système de régulation très complexe. En effet, la configuration d'écoulement représentée figure II-23 ne s'établit pas spontanément quand l'avion accélère jusqu'à sa vitesse de croisière : celle qu'on obtiendrait serait un écoulement interne entièrement subsonique, avec un choc détaché en amont

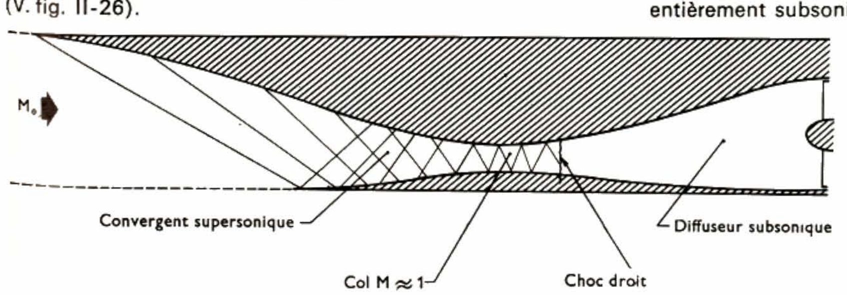


Fig. II-23

Entrée d'air à compression supersonique mixte

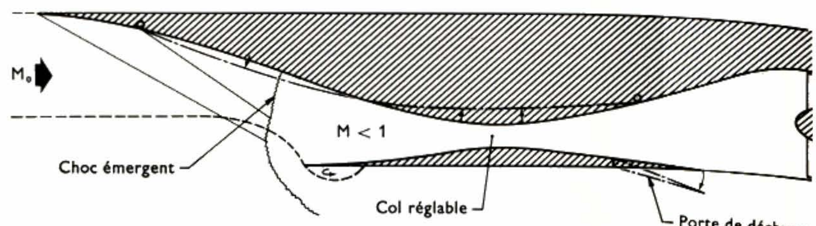


Fig. II-24

Entrée à compression supersonique mixte désamorcée

de l'entrée (fig. II-24). Cette configuration, dite désamorcée, est de faible efficacité et de forte traînée. Pour obtenir le fonctionnement adéquat, il est nécessaire d'élargir momentanément le col interne (ou d'évacuer « du débit » à l'amont), et d'ouvrir des portes de décharge afin d'amorcer un écoulement supersonique dans le convergent. Celui-ci amorcé, on resserre le col à sa valeur nominale et on referme les portes.

Divers incidents (rafales atmosphériques, réduction accidentelle du débit du moteur) peuvent entraîner le désamorçage de la prise d'air; il faut alors effectuer une manœuvre de réamorçage pour rétablir le bon fonctionnement. Les portes de décharge ont également pour rôle de permettre une réduction du débit du moteur sans désamorçage: leur débit de fuite compense le débit refusé par le moteur, en sorte que, jusqu'au col, l'écoulement amont reste identique à lui-même.

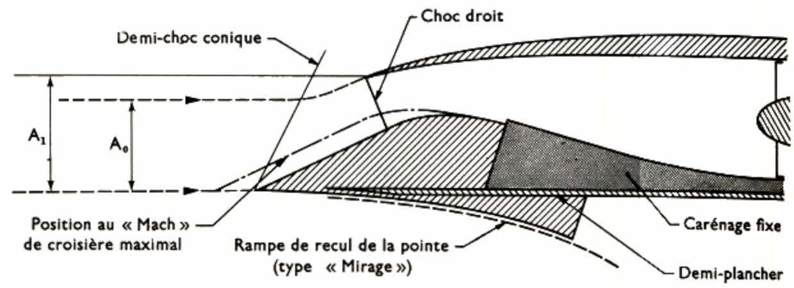


Fig. II-25

C.S.E. Adaptation à « Mach réduit » par recul de la pointe

5.2.4. Pièges à couche limite. — Lorsque la pression croît trop rapidement le long d'une paroi, la couche limite est refoulée vers l'amont et un décollement se forme, générateur de distorsion et de perte d'efficacité. Une onde de choc atteignant une paroi provoque un saut de pression qui entraîne de même une perturbation locale de la couche limite, ou un décollement important dès que le nombre de Mach du choc atteint ou dépasse 1,4.

Pour éviter ces perturbations, les prises d'air comportent généralement des pièges à couche limite, parois perméables par lesquelles la couche limite est aspirée; un piège à couche limite peut aussi être constitué par une fente assez large par laquelle le sillage de la zone décollée au pied du choc est éliminée (V. fig. II-26).

Des pièges sont notamment disposés à l'entrée des prises d'air à C.S.E., ou au col des prises d'air à C.S.M., sections où s'exerce le choc de passage du supersonique au subsonique. Ces pièges internes diffèrent des pièges amont, espacements laissés entre les prises d'air et les parois auxquelles elles sont accolées (aile, fuselage), et qui ont pour but d'éviter de capter dans la prise d'air la couche limite de ces parois, ce qui dégraderait l'efficacité et provoquerait une distorsion du profil des vitesses à l'entrée du moteur (par exemple, V. fig. II-27).

5.2.5. Réglage d'une entrée en fonction du nombre de Mach. — Le réglage consiste à déformer la géométrie de l'entrée de façon à assurer une performance optimale à chaque nombre de Mach.

Pour que l'efficacité soit optimale, c'est-à-dire pratiquement confondue avec la loi type, une condition nécessaire est de capter constamment le tube de courant adapté, dont la section A_0 est représentée figure II-13 (ou un tube de courant supérieur, sous réserve d'éliminer l'excédent d'air capté au moyen d'une dérivation interne ou de volets de décharge). Comme A_0, identique à A_1 en vol de croisière, diminue quand M_0 diminue, le débit excédentaire [représenté par $(A_1 - A_0)$] doit être dévié de l'entrée; on recherche pour cela la solution de moindre traînée.

L'efficacité est effectivement maximale si le débit capté passe du supersonique au subsonique par un choc faible. Cela signifie que le nombre de Mach dans la section d'entrée (C.S.E.) ou du col (C.S.M.), où se produit le choc terminal, est voisin de 1. Cette section est par conséquent voisine de la section A_{c2} (V. fig. II-14) et doit varier comme celle-ci, c'est-à-dire s'agrandir quand M_0 diminue depuis la valeur de croisière.

5.3. Description de solutions particulières

5.3.1. Entrée d'air à pointe conique, type Mirage (fig. II-25). — L'entrée est adaptée vers M_0 égal à 2. Le réglage consiste à reculer la pointe conique quand le nombre de Mach diminue, sinon une trop grande partie du débit est déviée à l'extérieur par la pointe émergente.

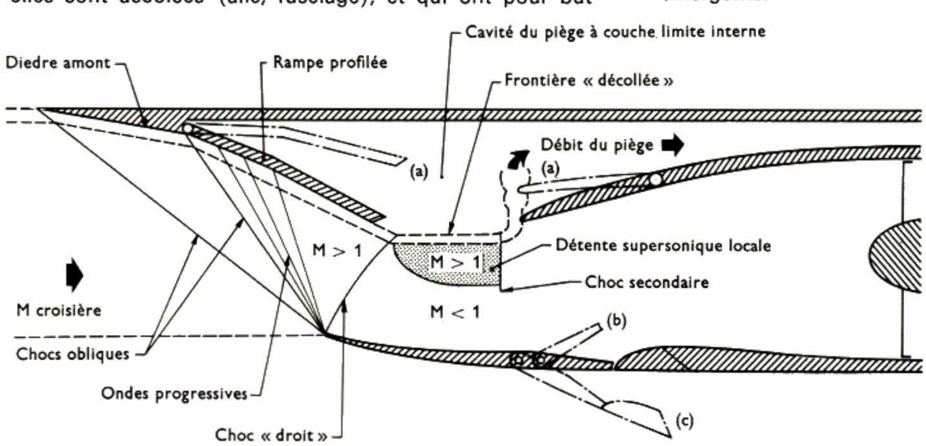


Fig. II-26

C.S.E. Concorde, adaptable à « Mach réduit » par effacement des rampes

(a) : la rampe amont et le volet du diffuseur se relèvent à « Mach » réduit
(b) : porte auxiliaire pour le décollage et les faibles vitesses
(c) : porte de décharge (moteur réduit, en supersonique)

5.3.2. Entrée d'air à dièdres et rampe du Concorde (V. fig. II-26). — L'entrée est adaptée lorsque M est égal à 2,1 (nombre de Mach sous la voilure quand l'avion est à $M_0 = 2{,}2$).

Un piège à couche limite est aménagé au pied du choc droit d'entrée, en laissant un espacement entre les volets mobiles amont et aval qui forment la paroi du conduit interne. Le débit de la couche limite est aspiré dans ce piège; il sert à refroidir la tuyère du moteur et est éjecté autour du col réglable de celle-ci.

Le réglage de l'entrée consiste à relever les rampes mobiles quand le nombre de Mach diminue, ce qui ajuste la section d'entrée interne et le débit capté. Sur la figure sont représentées la porte auxiliaire (décollage) et la porte de décharge (pour éviter le pompage, problème précisé au paragraphe 5.4). Sur l'avion une étrave sépare les deux prises d'air accolées, pour éviter des interactions mutuelles (fig. II-27). La carène a une petite découpe en onglet contre l'étrave et, de l'autre côté, le flanc latéral a une découpe en flèche prononcée: il s'agit de modifications locales pour améliorer le fonctionnement en dérapage.

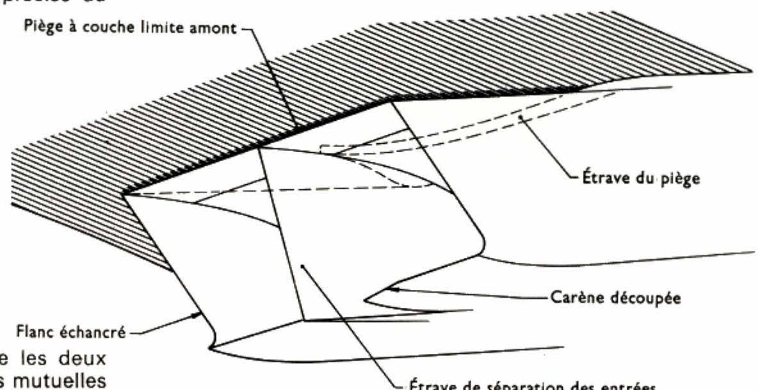


Fig. II-27
« Concorde ». Étrave et découpes des entrées jumelées. Piège à couche limite amont

5.3.3. Entrée d'air à double cône (avion de combat: $M \approx 2{,}5$) (fig. II-28). — Quand le nombre de Mach M_0 diminue, l'effacement du col d'entrée est obtenu en constituant le second cône et la partie avant du diffuseur interne par deux séries de pétales en vis-à-vis. L'espacement laissé entre ces deux éléments forme un piège à couche limite.

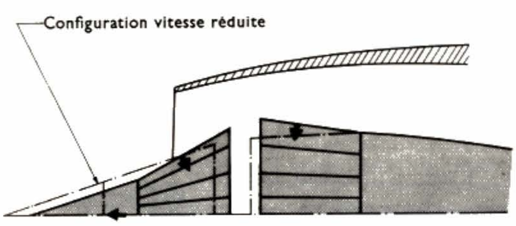


Fig. II-28 — Adaptation des entrées d'air à double cône

Sur certains avions, le premier cône se translate vers l'avant, tandis que les pétales qui le constituent, tenues par des biellettes, se replient autour de l'axe central selon le principe du parapluie. Cette disposition permet, à Mach réduit, une déviation plus progressive autour de l'entrée du débit excédentaire représenté par ($A_1 - A_0$) et, par conséquent, une moindre traînée.

5.3.4. Entrée d'air de révolution d'avions: $M \approx 3$ (fig. II-29). — Une des dispositions retenues pour une entrée à C.S.M. consiste à donner à la carène une forme convergente, en sorte que l'élargissement du col, quand le Mach de vol diminue, est obtenu par la translation du corps central vers l'amont (cela donne une allure caractéristique à ce type d'entrée, avec un corps central sorti au décollage, au lieu d'être rentré).

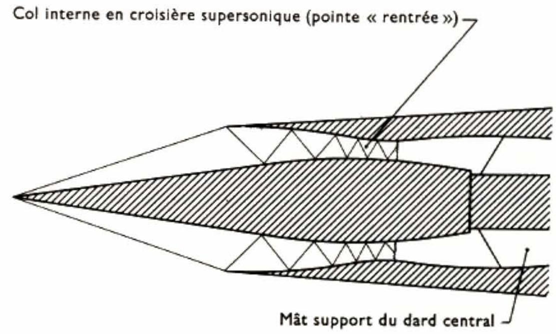
La manœuvre du corps central vers l'avant, combinée avec une ouverture des portes de décharge, permet par ailleurs l'amorçage.

5.3.5. Entrée bidimensionnelle d'avions: $M \approx 3$ (V. fig. II-24). — La paroi interne profilée est constituée de plusieurs panneaux montés sur des vérins, de façon à assurer un contour optimal à chaque nombre de Mach, et à satisfaire aux conditions d'amorçage. Pour faciliter l'adaptation, la partie avant de la carène peut également être réglable par pivotement. Ainsi, on peut réduire la section d'entrée quand le nombre de Mach de vol diminue. Des volets de décharge et d'amorçage complètent ces dispositions.

5.4. Pompage des entrées d'air supersoniques, et réglages en fonction du débit du moteur

5.4.1. Pompage. — Le pompage des entrées d'air (*buzz*, en anglais) est l'établissement d'un écoulement pulsatoire qui atteint parfois de très grandes amplitudes, avec une fluctuation du niveau des pressions internes voisin de 30 % par exemple.

Ce phénomène apparaît, en particulier, dans les entrées à C.S.E. quand, au voisinage du nombre de Mach de croisière,



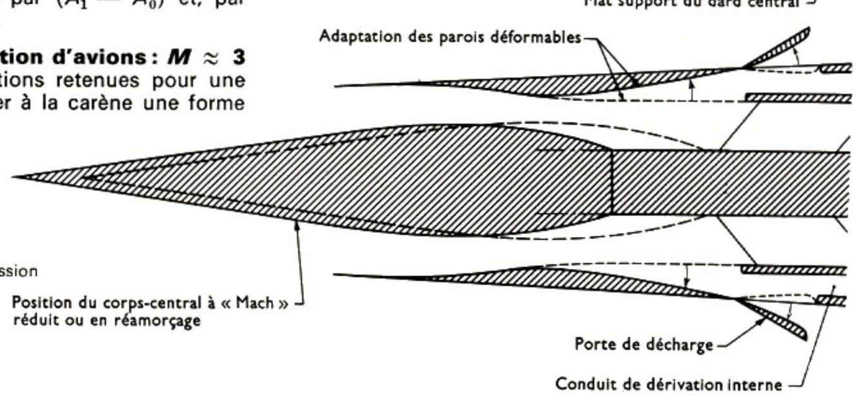
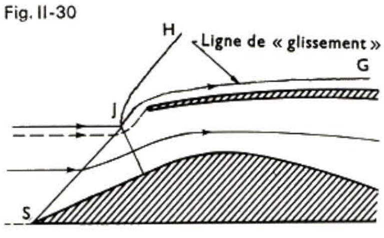


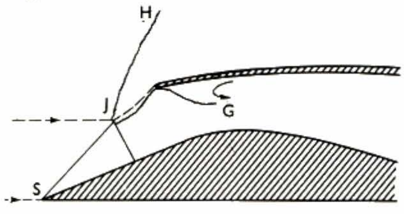
Fig. II-29
Réglage d'une prise d'air à compression supersonique mixte

Fig. II-30



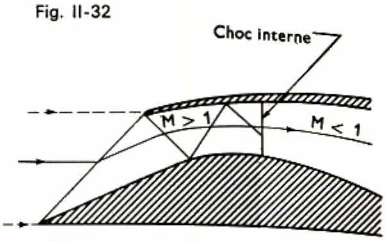
Régime « subcritique »

Fig. II-31



Blocage du débit d'entrée en pompage

Fig. II-32



Phase « supercritique » du pompage

on réduit le débit sans ajuster la géométrie. Il se présente habituellement aussi, en C.S.M., dès que le convergent supersonique se désamorce. Les phénomènes sont assez analogues, mais seul le cas d'une entrée à C.S.E. sera décrit ci-après. En C.S.E., une réduction du débit du moteur fait émerger le choc droit d'entrée (régime dit « subcritique ») : entre le choc émergent et le bord d'attaque de la carène, les lignes de courant sont fortement déviées vers l'extérieur, ce qui a pour effet de diminuer le débit capté, conformément à ce qui est imposé par le moteur (fig. II-30). Soit *J* le point de rencontre du choc émergent avec le choc conique (ou oblique en bidimensionnel) issu de la pointe avant *S* du profil de compression externe. L'écoulement interne est comprimé par un système progressif à deux chocs, d'efficacité élevée. L'écoulement externe (au-delà de la ligne de courant *JG* passant par *J*) traverse un choc unique de forte intensité, *JH*, et l'efficacité de cette compression est faible. *JG* forme une ligne de « glissement » qui sépare les deux écoulements. Si le débit est suffisamment réduit, le choc émerge davantage, *J* progresse vers *S* sur le choc de tête et la ligne de courant *JG* se rapproche de la carène et finit par passer dans la prise d'air. L'écoulement qu'elle délimite longe alors la carène interne et forme une couche limite d'efficacité réduite, qui ne peut subir la même compression que l'écoulement principal : cette couche limite est refoulée vers l'amont par l'air de forte pression contenu dans la prise d'air (décollement, fig. II-31). Il s'ensuit un brusque rétrécissement de la section de passage à l'entrée et une réduction du débit capté. Le débit du moteur étant alors plus grand que le débit d'entrée, la pression interne diminue. Cet abaissement de pression a pour effet de résorber le décollement d'entrée et équivaut à une demande de débit supérieure au débit maximal de l'entrée : comme dans le cas d'une section d'entrée trop petite, le choc se déplace de l'amont vers l'aval et s'établit à l'intérieur de la manche, derrière un écoulement d'entrée supersonique (régime « supercritique », fig. II-32).

Dans ces conditions le débit d'entrée étant supérieur au débit de sortie, la pression croît à nouveau dans la prise d'air où l'air s'accumule, et le choc est progressivement refoulé vers l'amont. Quand il émerge, la ligne de glissement repasse sur le bord d'attaque et à l'intérieur de la carène ; un décollement se forme à nouveau et le cycle de pompage se reproduit.

5.4.2. Réglage de l'entrée en fonction du régime du moteur. — Pour éviter le pompage, quand on réduit le débit il faut éviter l'émergence du choc d'entrée. Cela s'obtient habituellement de deux façons :

— par action sur les paramètres géométriques de la prise d'air, ce qui permet de dévier vers l'extérieur une partie du débit d'entrée (émergence du corps central ; redressement des rampes en C.S.E.),

— par ouverture, dans la prise d'air, de portes de décharge vers l'extérieur ; leur débit de fuite compense le débit refusé par le moteur.

5.5. Formes et adaptation des tuyères d'avions supersoniques. — Il s'agit d'adapter la géométrie de l'arrière-corps du fuseau-moteur de telle façon que la section du col de la tuyère (A_{cj}) et la section de sortie (A_j) suivent les lois A_{cj} et A_{j0} représentées figure II-17. L'écoulement externe doit se refermer très progressivement depuis la section du maître-couple jusqu'à la section du jet adapté A_{j0}, qui diminue quand le nombre de Mach du vol diminue.

5.5.1. Arrière-corps continuement déformable. — La solution la plus immédiate, du point de vue aérodynamique, consiste à concevoir une tuyère « convergente-

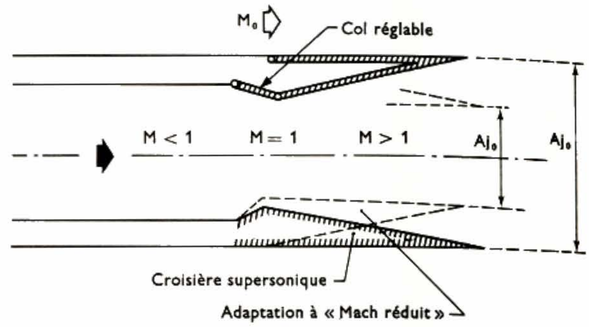


Fig. II-33 — Adaptation de l'arrière-corps

divergente » réglable (tuyère à pétales), entourée à l'extérieur d'un rétreint réglable, également à pétales, dont l'extrémité libre aval s'appuie sur les volets de la tuyère et se referme avec celle-ci (fig. II-33).

Une version voisine, plus usuelle, consiste à réaliser la tuyère à l'aide de deux séries de volets (figure II-34). La première a pour fonction de régler la section du col, la

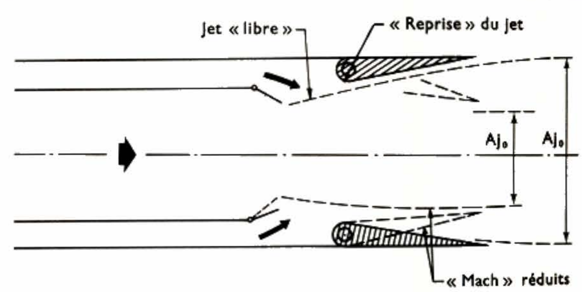


Fig. II-34 — Adaptation avec « reprise » de section fixe

seconde d'ajuster la section de sortie et la forme de a tuyère. Les seconds volets sont joints entre eux par des pétales externes et internes. Ils sont disposés de façon à être compatibles avec le débattement des premiers volets. Entre les deux volets, le jet se détend librement, sa frontière étant isobare à la pression moyenne régnant dans la cavité annulaire. Les seconds volets ont une butée à l'ouverture, pour supporter la poussée de la tuyère en vol de croisière ; ils peuvent être libres à la fermeture, de façon à éviter, à Mach plus faible, une surdétente du jet interne, et même pour bénéficier, en subsonique, d'une compression interne qui résulte de la fermeture progressive des volets. Cette fermeture est elle-même due au champ aérodynamique externe qui, en subsonique, donne une compression sur une forme de rétreint.

Un débit secondaire (débit des pièges à couche limite de la prise d'air) est généralement injecté dans l'espace annulaire libre, entre les volets, pour éviter un impact brusque du jet, issu du col, sur les pétales de reprise, ce qui diminuerait la poussée de la tuyère.

5.5.2. Arrière-corps bi-volets. — Dans certains cas (avions de combat à $M \approx 2$), la seconde série de volets est remplacée par des volets plus simples, à un seul jeu de pétales, qui assurent seulement la « fermeture » du rétreint.

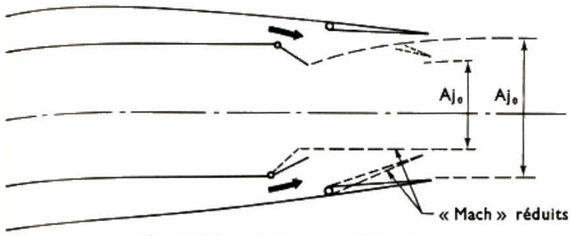


Fig. II-35 — Arrière-corps bi-volets

Le jet interne se détend librement jusque sur la face interne des volets de rétreint (V. fig. II-35). La simplicité de cette solution a pour contrepartie une poussée légèrement diminuée par l'absence de guidage du jet.

5.5.3. Arrière-corps à porte auxiliaire (prototypes « Concorde »). — (En anglais, *blow in door*). Dans ce cas, la fermeture progressive de l'écoulement autour du jet est assurée, à vitesse réduite, par l'ouverture de portes auxiliaires vers l'intérieur, et par la fermeture, en forme de rétreint, des volets d'extrémités (fig. II-36). En croisière supersonique, un débit secondaire provenant des pièges de la prise d'air

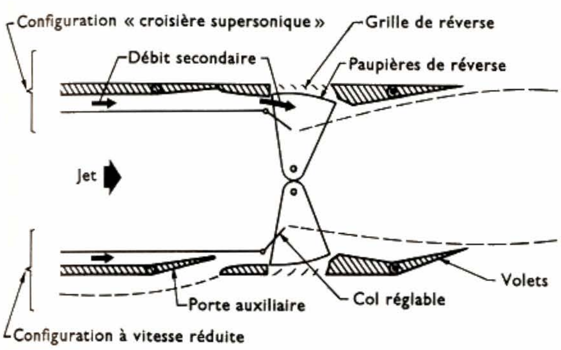
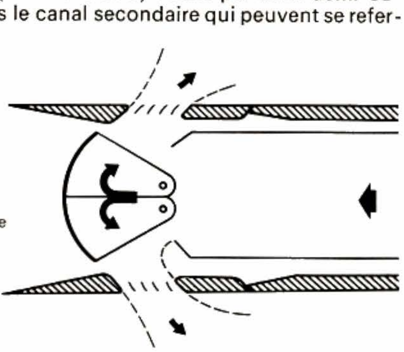


Fig. II-36 — Arrière-corps à porte auxiliaire

alimente l'espace annulaire dégagé dans la tuyère pour le passage du débit des portes auxiliaires. En même temps cette solution permet l'aménagement d'un système d'inverseur de poussée (ou « réverse ») formé par deux demi-coquilles logées dans le canal secondaire qui peuvent se refermer face au jet, en dégageant des aubages qui rejettent alors vers l'amont tout le débit de la tuyère (fig. II-37).

Fig. II-37

Fermeture des paupières de réverse



5.5.4. Tuyère à réverse aval (T.R.A.; Concorde) (fig. II-38). — Une autre solution, plus simple que la précédente, et assurant les mêmes fonctions, s'obtient en réalisant la tuyère en deux demi-coquilles qui, en se refermant modérément, dégagent des ouvertures jouant le rôle des portes auxiliaires précédentes, et, en se refermant complètement, forment inverseur de poussée, ou réverse.

Une paire d'ailettes longitudinales placées radialement sur les côtés internes des coquilles (donc pratiquement sans traînée interne, dans la configuration supersonique) participe à la déviation du jet en configuration « réverse ».

5.5.5. Tuyère à corps central (fig. II-39). — Une autre solution envisagée est celle d'un corps central qui assure une détente supersonique annulaire convenable en vol de

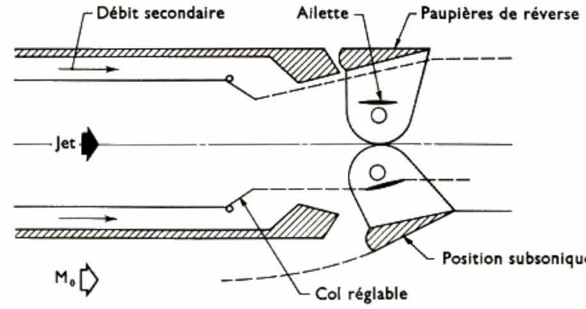


Fig. II-38 — Tuyère à réverse aval

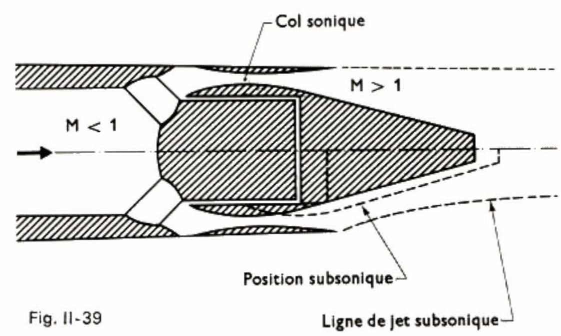


Fig. II-39

Tuyère à corps central

croisière et qui, par translation vers l'aval, permet une fermeture progressive de l'écoulement externe autour de la forme émergente.

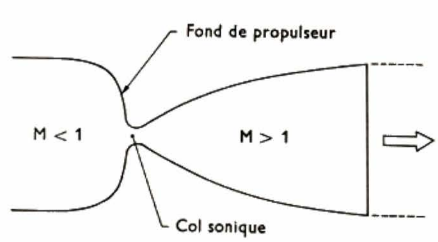
Cette configuration, très satisfaisante du point de vue aérodynamique, au moins en monomoteur, présente deux inconvénients à savoir un poids important et une difficile tenue thermomécanique du corps central placé en porte-à-faux.

5.5.6. Tuyères de fusée (fig. II-40). — Elles se distinguent des tuyères de réacteur par l'importance du taux de détente dû aux pressions élevées de combustion des poudres et des mélanges réactifs, et aussi à la trajectoire éventuelle à haute altitude, où la pression externe est très basse, sinon nulle (cas des fusées dans l'espace). Les plus évoluées ont des formes profilées assurant, à la sortie, des vitesses d'éjection pratiquement parallèles à l'axe de la tuyère, condition d'obtention de la poussée maximale.

Dans les fusées à hydrogène et oxygène liquides, le refroidissement de la tuyère est parfois assuré en réalisant les parois de celle-ci par un assemblage de tubes dans lesquels l'hydrogène circule avant d'être injecté dans la chambre de combustion. Dans d'autres cas, des matériaux ablatifs sont utilisés pour assurer la tenue de la région du col de la tuyère qui est soumise à des flux thermiques intenses.

Fig. II-40

Tuyère de fusée profilée



L'adaptation à un taux de détente variable, dû à la variation d'altitude, est généralement inexistante sur les fusées : on se contente d'un compromis entre les deux extrêmes : tuyère « surdétendue » à basse altitude (pression externe élevée par rapport à la pression de détente interne, d'où une traînée parasite) et tuyère sous détendue à haute altitude (pression externe de faible niveau par rapport à la pression de détente interne, d'où un manque de poussée par suite de la limitation de section).

6. HÉLICES

Nous ne considérons ici que les hélices tractives, les principes de fonctionnement des hélices sustentatrices étant évoqués au chapitre 7 qui traite des hélicoptères.

6.1. Définitions. — Une hélice est essentiellement constituée par un moyeu et des pales. Au début de leur utilisation en aéronautique, les pales étaient au nombre de deux ; actuellement, elles sont plus souvent au nombre de trois, voire quatre, et font entre elles des angles égaux.

Les hélices en bois constituent un ensemble monobloc ; les pales des hélices en métal, démontables, sont fixées sur un moyeu métallique. Dans un cas, comme dans l'autre, l'axe de l'hélice est en général confondu avec l'axe moteur ou bien lui est parallèle. L'axe de la pale est une droite liée à cet élément ; pour une pale orientable c'est l'axe autour duquel la pale peut tourner (en général, il est perpendiculaire à l'axe de l'hélice).

Le *plan de l'hélice* est celui qui est balayé par l'axe de la pale dans son mouvement de rotation lorsque l'avion est à point fixe. On l'appelle aussi *plan de rotation*.

La forme de la pale est caractérisée par l'ensemble des sections droites de la pale, relevées pour différentes valeurs de la distance r à l'axe de rotation. Chacune des sections droites est la forme de la coupe par un plan normal à l'axe de la pale. Ces sections droites ont des formes de profils calés à des angles θ, angles des cordes de ces profils avec le plan de l'hélice (fig. II-41 et II-42).

Fig. II-41

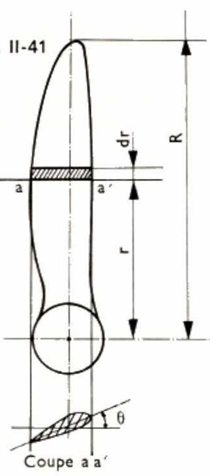
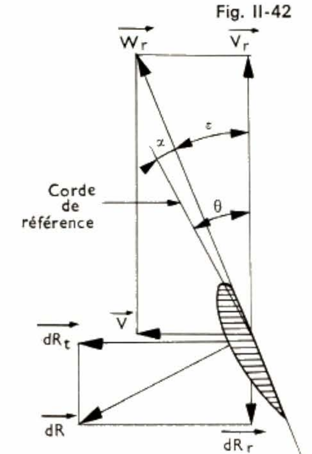


Fig. II-42



Les profils sont définis (comme pour un profil d'aile) par la longueur de la corde (largeur de la pale dans la section droite considérée), la courbure et l'épaisseur relative.

Le pas d'une section est le pas H de l'hélice géométrique tangente à la corde de référence du profil :

$$H = 2\,\pi r \operatorname{tg} \theta$$

Si $D = 2\,R$ est le diamètre de l'hélice, on appelle pas relatif le quotient $\frac{H}{D} = \pi \frac{r}{R} \operatorname{tg} \theta$.

L'hélice est dite à pas constant si toutes les sections ont le même pas. Le pas peut être évolutif entre les sections proches du moyeu et l'extrémité de la pale.

En ce qui concerne les hélices métalliques, on dit que l'hélice est à calage réglable, lorsque l'orientation de la pale autour de son axe ne peut être modifiée qu'au repos ; si cette opération peut être réalisée durant la rotation de l'hélice, celle-ci est dite à *pas variable* ou *calage variable*.

6.2. Fonctionnement aérodynamique. — Appelons (V. fig. II-42) :

$\vec{V}$ la vitesse de translation de l'hélice,

N la fréquence de rotation de l'hélice en tours par seconde,

V_r la vitesse de rotation d'une section droite de pale à la distance r de l'axe ($V_r = 2\pi N r$),

W_r la vitesse résultante de cette section droite, située à la distance r de l'axe,

ε, l'angle du vecteur vitesse W_r avec le plan de rotation de l'hélice.

Nous pouvons écrire : $\vec{W_r} = \vec{V} + \vec{V_r}$

$$W_r = \sqrt{V^2 + 4\,\pi^2 N^2 r^2}$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{V}{2\,\pi N r}$$

Par ailleurs, pour le profil situé à la distance r de l'axe, l'angle d'incidence géométrique α est égal à $(\theta - \varepsilon)$.

En fait, sur la pale d'hélice, comme sur une aile d'envergure limitée, les vitesses induites (V. chap. 1, § 4.1.1) réduisent la valeur de α. L'incidence effective est plus faible que l'incidence géométrique.

La vitesse $\vec{V}$ de translation de l'hélice étant la même pour toutes les sections droites de l'hélice et la vitesse de rotation $2\,\pi N r$ croissant du moyeu jusqu'à l'extrémité de pale, l'angle ε diminue lorsque r augmente. Il s'ensuit que θ doit également diminuer, lorsque r augmente, afin de conserver à l'angle α correspondant une valeur de bonne efficacité.

6.3. Fonctionnement de l'élément de pale. — Considérons l'élément de pale compris entre les distances r et $r + dr$ de l'axe de rotation (V. fig. II-41). Appelons (V. fig. II-42), par assimilation avec un élément d'aile :

$\vec{dR}$ la résultante de l'action du vent relatif de vitesse $\vec{W_0}$ sur cet élément (elle est égale et opposée à W_r),

$\vec{dR_t}$ la composante de traction (portance de l'élément),

$\vec{dR_r}$ la composante résistante (traînée de l'élément).

Le moment élémentaire résistant à la rotation est égal à $dM = r\,dR_r$ et pour le vaincre il faut fournir une puissance élémentaire $dP = 2\,\pi N\,dM = 2\,\pi N r\,dR_r$, alors que la puissance récupérée est égale à $V dR_t$. Le rendement de l'élément de pale est alors : $\eta = \frac{V dR_t}{2\pi N r\,dR_r} = \frac{dRt}{dR_r} \operatorname{tg} \varepsilon$.

Si dS est la surface de l'élément de pale de longueur dr, par analogie avec un élément d'aile nous pouvons poser : $dR_t = C_t \frac{1}{2} \rho\, W_0^2\, dS$ et $dR_r = C_r \frac{1}{2} \rho\, W_0^2\, dS$.

Une intégration fournit les valeurs globales de traction et de puissance, en tenant compte du nombre de pales.

En posant $\frac{C_t}{C_r} = \operatorname{tg}\theta$, le rendement est :

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \varepsilon}{\operatorname{tg}\,(\varepsilon + \theta)}$$

6.4. Coefficients caractéristiques. — On admet généralement que la traction et la puissance sont principalement fonction des seuls termes ρ, N, D, V et θ. Des considérations d'homogénéité de formules avec les dimensions d'une traction et d'une puissance, conduisent à écrire :

$$T = \tau \rho\, N^2 D^4$$

et :

$$P = \chi \rho\, N^3 D^5$$

où τ et χ, respectivement appelés coefficients de traction et de puissance, sont sans dimensions, et ne dépendent en première approximation, que du calage θ et du rapport $\gamma = \frac{V}{ND}$.

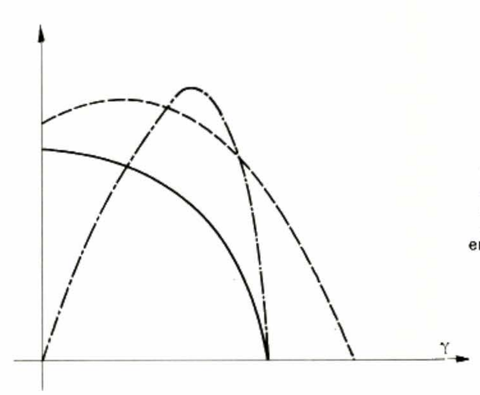


Fig. II-43

Variation de :
——— τ
— · — η
— — — χ
en fonction de γ

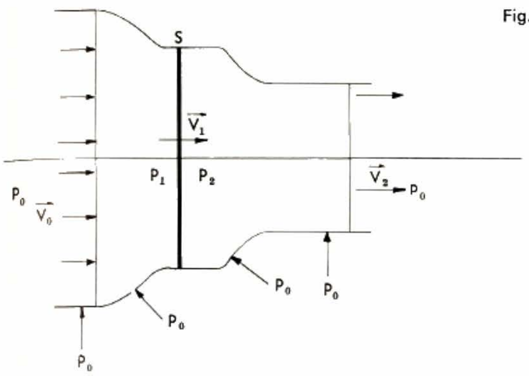
Le rendement de l'hélice $\frac{VT}{P}$ peut s'écrire alors :

$$\eta = \gamma \frac{\tau}{\chi}$$

Aux effets près des nombres de Reynolds et de Mach, des hélices géométriquement semblables, fonctionnant aux mêmes valeurs de γ, sont caractérisées par les mêmes valeurs de coefficients τ, χ et η. Les variations de ces coefficients en fonction de γ sont représentées sur la figure II-43.

6.5. Théorie sommaire de l'hélice. — D'une façon assez approchée, l'action de l'hélice sur l'air peut être schématisée par la figure II-44, suivant une théorie due à Froude dans laquelle on ne retient que le phénomène moyen (alors que ce phénomène est évidemment cyclique).

Fig. II-44



Le plan de rotation de l'hélice étant assimilé à un disque de surface S, appelons $\vec{V_0}$, $\vec{V_1}$ et $\vec{V_2}$ les vitesses axiales, respectivement à l'infini amont, à la traversée de cette surface S et à l'infini aval. Soit p_0 la pression à l'infini amont, à l'infini aval et sur le contour de la veine d'air en interaction avec l'hélice. Soit p_a et p_b les pressions respectivement immédiatement à l'amont et à l'aval du plan de l'hélice.

L'application du théorème de Bernoulli à un fluide incompressible (V. t. 3. Mécanique des fluides, chap. 3), permet d'écrire :

$$p_0 + \frac{\rho_0}{2} V_0{}^2 = p_1 + \frac{\rho_0}{2} V_1{}^2$$

$$p_2 + \frac{\rho_0}{2} V_1{}^2 = p_0 + \frac{\rho_0}{2} V_2{}^2$$

Par suite de la dépression régnant sur la face amont du disque $\vec{V_1}$ est supérieur à $\vec{V_0}$:

$$p_1 < p_0 \Rightarrow V_1 > V_0$$

— À la traversée du disque, il est admis que la vitesse $\vec{V_1}$ reste inchangée, alors que la pression atteint une valeur p_2 supérieure à p_0, puisque l'hélice développe une traction.

— À l'infini aval où la pression retrouve la valeur p_0 ; la vitesse $\vec{V_2}$ est supérieure à $\vec{V_0}$:

$$p_0 < p_2 \Rightarrow V_2 > V_0$$

Une masse d'air m traverse le plan de rotation de l'hélice ($m = \rho_0 \, S \, V_1$). La différence des quantités de mouvement de cette masse d'air, prise entre l'amont et l'aval ($m \, V_2 - mV_0$) est égale à la somme des forces extérieures projetées sur l'axe $\overrightarrow{OX}$. En fait, cette composante se réduit à la force appliquée par l'hélice à l'air, force égale et opposée à la traction T de cette hélice.

Donc : $$T = m(V_2 - V_0)$$

Par ailleurs, la variation de quantités de mouvement dans le volume entourant étroitement le disque schématisant le plan de rotation de l'hélice, est nulle puisqu'il a été admis que la vitesse V_1 ne variait pas :

$$(p_1 - p_2) \, S + T = 0 \qquad (1)$$

d'où : $T = (p_2 - p_1) \, S = m(V_2 - V_0) = \rho_0 \, S \, V_1 \, (V_2 - V_0)$ (2)

En tirant la valeur de la différence $(p_2 - p_1)$ des équations (1) et (2) il vient :

$$p_2 - p_1 = \frac{\rho_0}{2} (V_2^2 - V_0^2)$$

et : $$\frac{\rho_0}{2} (V_2^2 - V_0^2) \; S = \rho_0 \; S \; V_1 \; (V_2 - V_0)$$

après simplification nous pouvons écrire :

$$V_1 = \frac{V_2 + V_0}{2}$$

ce qui montre que la vitesse dans le plan de rotation de l'hélice est la moyenne de V_0 et V_2.

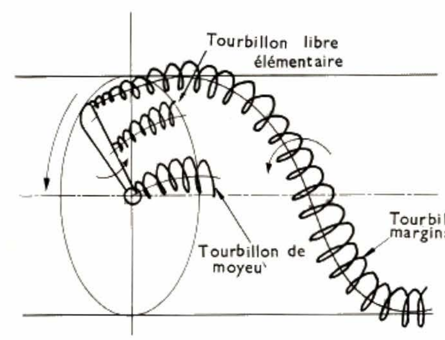
La théorie de Froude permet également d'obtenir des relations entre V_0, V_2, τ et γ :

$$\left(\frac{V_2}{V_0}\right)^2 = 1 + \frac{8\tau}{\pi\gamma^2}$$

et : $$\eta = \frac{2}{1 + \frac{V_2}{V_0}}$$

Ces résultats ne sont qu'approchés car le fluide n'est pas parfait. Il se produit des pertes par viscosité, à l'intérieur de la veine fluide et sur son pourtour et des pertes par frottement sur les pales. De plus, la veine soufflée est animée d'un mouvement de rotation et la pression n'est pas uniforme dans tout le cercle balayé par l'hélice. Par ailleurs, l'écoulement n'est pas permanent mais cyclique et il est fonction du nombre de pales. C'est dire que, comme pour une aile d'envergure limitée, à l'aval d'une pale s'établissent

Fig. II-45



une nappe de tourbillons libres et deux tourbillons marginaux, l'un à l'extrémité de la pale et l'autre vers le moyeu ; ce dernier tourbillon est perturbé par la présence de ce moyeu (fig. II-45). Ces divers tourbillons donnent naissance à des vitesses induites axiales ($\overrightarrow{w_z}$) et tangentielles ($\overrightarrow{w_\theta}$) ce qui modifie l'incidence effective de la pale. Ces vitesses induites dépendent de la distance r. La vitesse induite axiale est telle qu'elle augmente la vitesse relative $\vec{V}$ alors que la vitesse induite tangentielle est de sens opposé à la vitesse périphérique $\vec{V_r}$ (fig. II-46). Ainsi la vitesse résultante $\vec{W'}$ est égale à :

$$W' = \sqrt{(V + w_z)^2 + (V_r - w_\theta)^2}$$

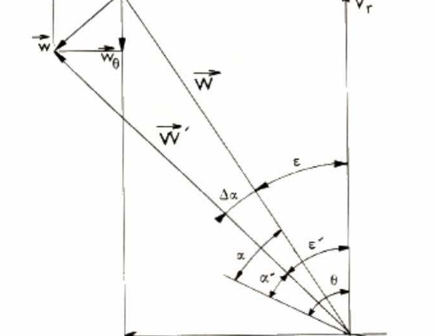


Fig. II-46

La variation d'incidence $\frac{W}{W'}$ a sensiblement pour valeur

$$\Delta\alpha = \frac{W_z}{V_r}$$

et l'incidence effective a une valeur α' telle que :

$$\alpha' = \alpha - \Delta\alpha = \theta - \varepsilon - \Delta\alpha$$

Le calcul de détermination des hélices est basé sur une théorie tourbillonnaire, en assimilant à un tourbillon attaché chacune des pales dont sont issues des nappes de tourbillons libres.

6.6. Résultats généraux

6.6.1. Influence du profil. — Il y a intérêt à rechercher et la finesse maximale, pour obtenir l'efficacité maximale, et la sustentation la plus grande, pour que la traction soit suffisante au décollage. En général, les profils sont assez minces et à squelette légèrement concave. Les épaisseurs relatives sont souvent décroissantes depuis le moyeu jusqu'à l'extrémité de pale, de façon à concilier la résistance mécanique de la pale et l'effet de l'approche des vitesses soniques en bout de pale.

L'état de surface est très important : le rendement peut décroître de 0,85 à 0,80 si la traînée de profil double.

6.6.2. Influence du pas. — Le pas conditionne la répartition des caractéristiques aérodynamiques le long de la pale et donc les valeurs de la traction, en vol et au point fixe (pour le décollage), ainsi que celles de la puissance absorbée.

La figure II-47 montre l'évolution des caractéristiques de rendement d'une hélice à calage variable qui permet de conserver l'efficacité maximale, en se plaçant constamment sur la courbe enveloppe, au cours des divers régimes de vol, y compris au décollage.

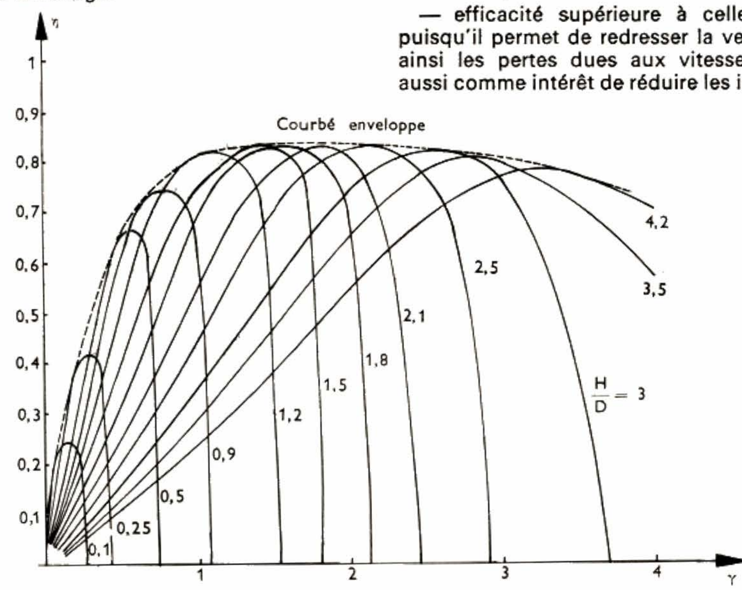


Fig. II-47

Ainsi une hélice calée de façon que $\frac{H}{D} = 3{,}5$, permet d'atteindre un rendement de 80 % pour $\gamma = 2{,}8$ mais seulement de 45 % pour $\gamma = 1{,}5$, alors que l'hélice à pas variable permet d'obtenir 85 % dans ce dernier cas.

6.6.3. Influence de la distribution des calages le long de la pale. — Deux hélices ayant le même nombre de pales, le même profil, la même distribution de largeur et d'épaisseur relative en fonction de $\frac{r}{R}$ mais dont les calages suivent des lois différentes bien que leur pas soit le même à $0{,}75\,R$, présentent des courbes τ et χ presque identiques, à 1 % près.

6.6.4. Influence de la forme des pales. — La forme de la pale, qui est souvent déterminée par des soucis de résistance mécanique, entraîne des écarts importants sur τ et χ. Elle peut entraîner une diminution de rendement de 3 à 4 %. Une décroissance sensiblement progressive de la largeur de pale à partir du moyeu donne de bons résultats.

6.6.5. Influence du nombre de pales. — En conformité avec la théorie tourbillonnaire de l'hélice, et à égalité de surface totale de pale, la valeur du rendement augmente de 4 à 5 % quand on passe d'une hélice bipale à une hélice tripale mais ce résultat ne doit pas être extrapolé.

6.6.6. Influence de la compressibilité. — Comme la vitesse résultante d'une section de pale (profil) est d'autant plus grande que cette section se rapproche de l'extrémité de pale, c'est sur ces sections que se font principalement sentir les effets de compressibilité due à l'augmentation du nombre de Mach. Cependant, dans le cas des avions rapides, il intervient sur toute la pale, mais plus progressivement que sur une aile, tant que l'extrémité de pale n'atteint pas la vitesse du son.

En raison de l'augmentation de puissance des unités motrices équipant les avions, les caractéristiques de l'hélice capable d'absorber ces puissances, sont un compromis entre un diamètre maximal limité par la vitesse périphérique, une largeur de pale dont l'augmentation entraîne une diminution de rendement, et l'incidence maximale des profils limitée par les effets de compressibilité. Cela explique que les avions très rapides ne puissent utiliser que la propulsion par réaction.

6.6.7. Doublet d'hélices coaxiales. — L'influence néfaste de la compressibilité peut être retardée par l'utilisation de doublets d'hélices coaxiales, tournant en sens inverse dans des plans très rapprochés. On appelle encore un tel ensemble hélices contrarotatives. Si l'emploi d'un tel tandem entraîne une complication mécanique, il apporte les avantages suivants :

— efficacité supérieure à celle d'une hélice unique, puisqu'il permet de redresser la veine soufflée et d'annuler ainsi les pertes dues aux vitesses tangentielles. Cela a aussi comme intérêt de réduire les interactions défavorables sur le planeur, d'entraîner moins de trouble à l'écoulement de l'air autour de l'aile, voire d'améliorer la sustentation du planeur ;

— sur avion monomoteur il permet d'annuler le couple de renversement ;

— sur avion multimoteur il divise par deux le nombre des fuseaux et apporte une diminution de traînée ;

— il permet de réduire le diamètre pour retarder les effets de compressibilité et, ce faisant, de diminuer la hauteur du train d'atterrissage (d'où un gain de poids).

L'efficacité d'un doublet qui est déjà supérieure de 3 à 4 % à celle de l'hélice simple pour les nombres de Mach inférieurs à 0,7, deviendrait encore plus importante pour des nombres de Mach supérieurs, puisque l'efficacité de l'hélice simple capable d'absorber la même puissance (plus grand diamètre, plus grande incidence, etc.) serait devenue très faible.

CHAPITRE III

MÉCANIQUE DU VOL

1. LE VOL DE L'AVION

1.1. Les objectifs de la mécanique du vol. — Au même titre que la résistance des structures, l'aérodynamique, l'électronique, l'informatique, etc., la mécanique du vol est l'un des outils utilisés par l'ingénieur pour la conception et la réalisation des avions.

De façon assez arbitraire, on divise la mécanique du vol en deux parties, l'étude des performances et l'étude des qualités de vol.

Les équations régissant les performances, c'est-à-dire permettant de déterminer les vitesses sur trajectoire, les pentes et les temps de montée, les altitudes de vol, etc., d'un avion sont assez simples à établir et à traiter sur le plan mathématique lorsque l'on connaît les caractéristiques géométriques, massiques et aérodynamiques de l'avion. Le vrai problème de l'ingénieur de bureau d'étude consiste à évaluer ces caractéristiques pour un avion en projet, à partir des études de résistance des matériaux, des études aérodynamiques, des essais partiels de résistance des structures et des essais en soufflerie. Un « bouclage » permanent est à effectuer au cours de cette étude, du fait que la masse et les dimensions de l'avion dépendent de la quantité de combustible à emporter et que celle-ci, pour réaliser une performance déterminée, dépend de la masse de l'avion et de ses dimensions.

Les équations régissant les qualités de vol de l'avion, c'est-à-dire les mouvements de l'avion, autour de son centre de gravité, provoqués par le déplacement des gouvernes de l'avion, sont plus complexes que les équations de performances. L'étude de ces mouvements n'a pu être sérieusement entreprise que depuis l'apparition des calculateurs analogiques ou digitaux qui permettent l'intégration en temps réel de ces équations différentielles; l'étude mathématique de ces mouvements se heurte néanmoins à un grave problème de principe: l'homme qui pilote l'avion ne peut être représenté mathématiquement même sous forme d'une fonction très complexe ce qui nécessite de faire intervenir le pilote réel dans l'étude des qualités de vol. Ces études peuvent être effectuées au simulateur de vol: un ordinateur calcule alors les mouvements de l'avion simulé répondant aux actions du pilote réel.

Il n'est pas question de détailler ici tout l'arsenal mathématique nécessaire à l'étude précise de la mécanique du vol. Nous nous contenterons, à l'aide des notions courantes de la mécanique rationnelle et des résultats théoriques et expérimentaux exposés dans les deux paragraphes précédents, d'expliquer comment le pilote parvient à diriger sa machine au cours des principales phases du vol.

1.2. Notions de pilotage d'un véhicule. — Piloter un véhicule signifie lui faire suivre une trajectoire, préalablement définie, avec une certaine loi de vitesse. Les choix de la trajectoire et de la loi de vitesse dépendent des obstacles placés sur le trajet et des caractéristiques propres du véhicule (performances et limitations d'emploi). Pour prendre un exemple familier à tous, la trajectoire d'une automobile doit être maintenue sur la partie autorisée de la chaussée et la loi de vitesse observée par le conducteur est limitée par la performance maximale du moteur, par les caractéristiques du véhicule déterminant les limites de dérapage, par les limitations de vitesse imposées par la réglementation, etc.

Pour suivre la trajectoire et la loi de vitesse ainsi imposée le pilote doit modifier les forces agissant sur le véhicule; nous disons bien modifier les forces et non pas modifier l'orientation du véhicule; il y a souvent confusion dans les esprits à ce propos car, généralement, une modification de l'orientation du véhicule par rapport à la direction de sa vitesse conduit à une modification des forces agissant sur le véhicule.

Quelques exemples vont préciser cette notion qui est une conséquence directe du principe d'inertie.

Rappelons qu'un véhicule soumis à un système de forces dont la résultante est nulle décrit une trajectoire rectiligne à vitesse constante.

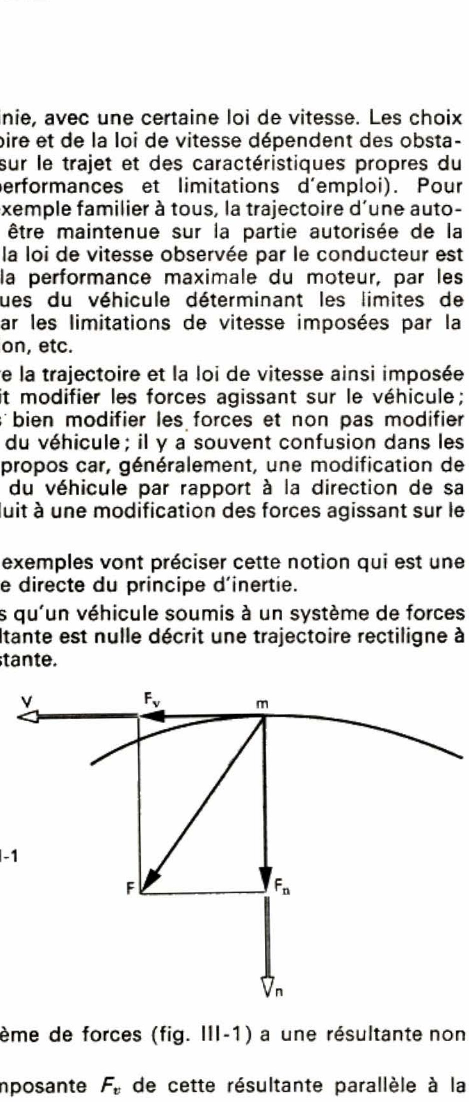


Fig. III-1

Si le système de forces (fig. III-1) a une résultante non nulle:

— la composante F_v de cette résultante parallèle à la vitesse $\vec{V}$, modifie cette vitesse:

$$F_v = m\frac{dV}{dt} \qquad (1)$$

où m est la masse du véhicule, $\frac{dV}{dt}$ la dérivée de la vitesse V par rapport au temps.

— la composante F_n de cette résultante suivant la normale $\vec{n}$ à la trajectoire (donc perpendiculaire à la vitesse) courbe la trajectoire :

$$F_n = m \frac{V^2}{R} \qquad (2)$$

où R est le rayon de courbure de la trajectoire dans le plan $\vec{V}$, $\vec{n}$. Ces deux relations ne sont que la traduction du principe d'inertie :

$$\vec{F} = m\vec{\Gamma}$$

où $\vec{F}$ est la résultante des forces agissant sur le véhicule de masse m et $\vec{\Gamma}$ le vecteur accélération.

Par conséquent si le pilote veut modifier sa vitesse sur trajectoire il doit créer ou modifier les forces parallèles à la vitesse ; s'il veut modifier la direction de sa trajectoire il doit créer ou modifier des forces perpendiculaires à la vitesse.

Considérons, par exemple, un satellite se déplaçant horizontalement à la vitesse $\vec{V}$, à la distance z de la surface de la Lune, supposée sphérique.

Si le moteur fusée est stoppé, la seule force à laquelle est soumis le véhicule est la force d'attraction lunaire soit mg_{lz} dirigée vers le centre de la Lune (m est la masse du satellite et g_{lz} l'accélération de la pesanteur lunaire à l'altitude z). Par conséquent le rayon de courbure R de la trajectoire est donné par :

$$F_n = mg_{lz} = m\,V^2/R$$

D'où :

$$R = V^2/g_{lz}$$

V étant constante, la trajectoire est un cercle de rayon $R = R_l + z$ (où R_l est le rayon de la Lune).

Pour fixer les idées, la vitesse de satellisation à l'altitude de 15 km est de 1 671 m/s (avec nos hypothèses simplificatrices et en prenant $g_{lz} = 1{,}595$ m/s², $R_l = 1\ 736$ km).

Dans ce cas particulier, il est évident qu'une modification de l'orientation du satellite par rapport au vecteur vitesse est sans aucun effet sur la trajectoire puisqu'aucune force supplémentaire n'en résulterait. L'équipage ne peut modifier la trajectoire qu'en créant une force à l'aide du moteur fusée. Ce moteur n'étant pas supposé orientable par rapport au véhicule, l'équipage agira sur la direction de la force de poussée en modifiant l'orientation du véhicule et sur l'intensité de la force de poussée en réglant le débit d'ergol injecté dans la fusée ; ces deux actions sont indépendantes dans ce cas ; nous verrons ultérieurement que ce n'est généralement pas le cas et que souvent grandeur et direction des forces sont liées, ce qui complique le pilotage et la compréhension des phénomènes.

Pour modifier l'orientation du véhicule, l'équipage doit créer un couple C autour du centre de gravité. Si l'orientation du véhicule par rapport à un trièdre galiléen (1), donc à un instant déterminé par rapport au vecteur vitesse, est définie par l'angle θ, ce couple est donné par la relation :

$$C = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \qquad (3)$$

où I est le moment d'inertie du véhicule autour de l'axe du couple et $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ la dérivée seconde de θ par rapport au temps (rappelons que θ, angle repérant la position du véhicule, est défini dans le plan normal au vecteur couple).

Dans le cas particulier du satellite, le couple est créé par deux moteurs fusée ayant des poussées égales et de sens contraire et disposés de part et d'autre du centre de gravité.

L'équipage peut agir sur la grandeur du couple en réglant le débit d'ergol des fusées.

Là encore, constatons que la commande d'orientation du véhicule est sans action sur la trajectoire car cette commande crée seulement un couple et non une force. Dans le cas général, nous verrons que les commandes d'orientation du véhicule créent non seulement un couple, mais également une force ce qui vient encore accroître la complexité du pilotage.

(1) Trièdre de référence en mouvement de translation par rapport à un repère fixe dont les axes relient le centre de gravité du système solaire et trois étoiles fixes de ce système (repère de Copernic).

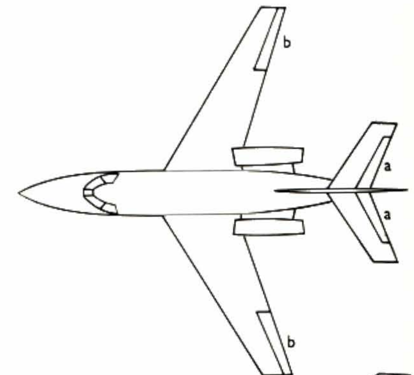


Fig. III-2 a

a : gouverne de profondeur
b : ailerons ou gouverne de gauchissement
c : gouverne de direction



Fig. III-2 b

Cela étant compris, comment se pilote un avion ? Le pilote dispose de quatre commandes principales agissant sur le moteur et les gouvernes :

1° *Le manche* qui est une commande double :

a) *par déplacement du manche dans le sens longitudinal*, le pilote modifie la position de la gouverne de profondeur qui est un volet mobile placé au bord de fuite de l'empennage horizontal (fig. III-2 a et III-3). La modi-

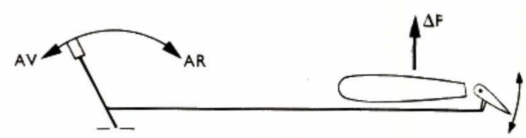


Fig. III-3

fication de forme de l'empennage horizontal se traduit par une modification des forces aérodynamiques sur l'empennage : un braquage vers le bas provoque une augmentation de la portance locale. Comme nous le verrons plus loin cette augmentation de portance est pratiquement négligeable devant la portance de l'aile. En revanche, l'empennage étant, par construction, situé loin du centre de gravité de l'avion, le moment de cette force par rapport au centre de gravité n'est pas négligeable. Ainsi un déplacement du manche vers l'avant, abaissant la gouverne de profondeur vers le bas provoque un moment dit de tangage tendant à faire baisser le nez de l'avion (moment piqueur) ; un déplacement vers l'arrière provoque un moment tendant à lever le nez de l'avion (moment cabreur).

b) *par déplacement latéral du manche*, le pilote modifie la position des ailerons, volets placés au bord de fuite à l'extrémité des ailes (fig. III-2 b). Les ailerons sont également nommés gouvernes de gauchissement. Un déplacement du manche vers la gauche élève l'aileron gauche et abaisse l'aileron droit (fig. III-4). La modification du profil de la partie aileronnée de l'aile gauche conduit à

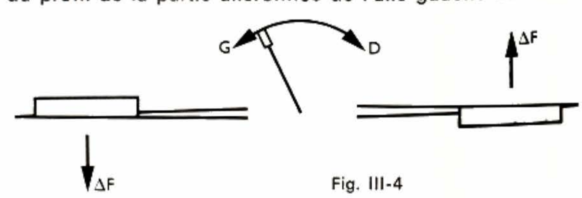


Fig. III-4

une diminution locale de la portance. De même, la modification du profil de la partie aileronnée de l'aile droite conduit à une augmentation locale de la portance. Pour les petits braquages antisymétriques, la portance globale de la voilure n'est pas modifiée (les variations de portance sur les deux voilures sont égales et de sens contraire). En revanche, ce braquage produit un couple dit de roulis tendant à faire tourner l'avion autour de son axe longitudinal ; un déplacement du manche à gauche produit un couple tendant à faire baisser l'aile gauche (roulis à gauche).

2° *Le palonnier* actionné par les pieds du pilote et qui commande le déplacement de la gouverne dite de direction, volet placé au bord de fuite de l'empennage vertical (fig. III-2 c). Un déplacement vers l'avant de la pédale droite (donc un déplacement vers l'arrière de la pédale gauche), produit un déplacement vers la droite de la gouverne de direction (fig. III-5). La modification de forme du profil de l'empennage vertical produit une force de portance perpendiculaire au plan de symétrie de l'avion.

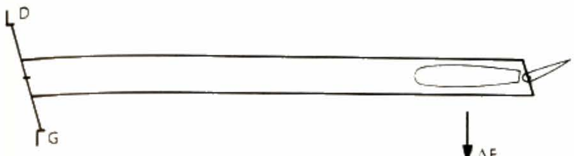


Fig. III-5

Cette force latérale est négligeable en première approximation. Le moment par rapport au centre de gravité dit moment de lacet tend à faire tourner le nez de l'avion vers la droite.

Ainsi quand le pilote appuie sur la pédale droite, il commande une rotation du nez de l'avion vers la droite.

3° *La manette des gaz* qui commande les variations de poussée du moteur. Un déplacement de la manette vers l'avant augmente la poussée.

Revenons sur l'action des gouvernes pour insister à nouveau sur un point fondamental.

Le braquage d'une gouverne dû au déplacement d'une commande, crée essentiellement un moment ou un couple qui produit un mouvement de rotation de l'avion par rapport au vecteur vitesse ; ce braquage n'agit pas directement sur la trajectoire car les forces ainsi créées sont en général négligeables.

La gouverne de profondeur (déplacement longitudinal du manche) modifie l'angle entre le plan de l'aile et la vitesse, c'est-à-dire l'incidence de la voilure.

La gouverne de gauchissement (déplacement latéral du manche) fait tourner l'avion autour du vecteur vitesse.

La gouverne de direction (palonnier) modifie l'angle entre le vecteur vitesse et l'axe du fuselage c'est-à-dire l'angle de dérapage.

La figure III-6 précise les définitions des angles d'incidence α et de dérapage β. La gouverne de direction ne sert

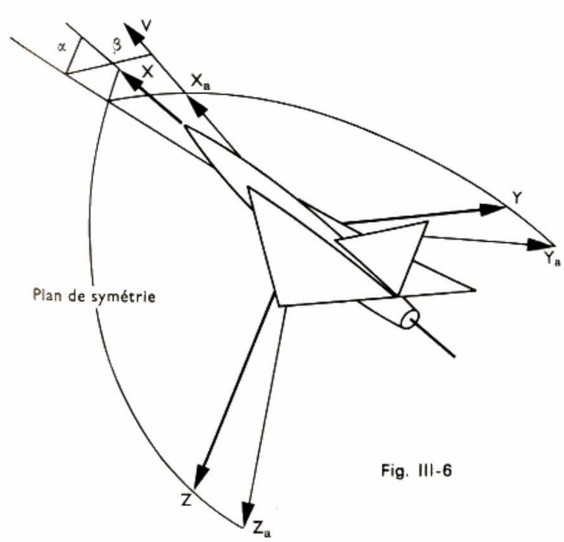


Fig. III-6

pratiquement pas à « diriger » l'avion : elle n'est utilisée en pratique par le pilote que pour maintenir l'angle de dérapage β nul. Lorsque l'avion possède un plan de symétrie (ce qui est généralement le cas, sauf si les charges extérieures, bidons, engins, sont dissymétriques) et lorsque les moteurs fournissent des poussées symétriques, la résultante des forces aérodynamiques se trouve alors, à dérapage nul, située dans le plan de symétrie.

Pour maintenir le dérapage nul, le pilote dispose de la « bille » qui n'est autre qu'un niveau pendulaire situé dans le plan G_yG_z perpendiculaire à l'axe du fuselage (ce niveau est constitué d'une bille se déplaçant dans un tube torique situé dans le plan G_yG_z, c'est-à-dire dans le plan du tableau de bord). Sans faire la théorie de la bille sachons que si bille est « au milieu » du tube, le dérapage est nul et que le vecteur vitesse se trouve du même côté que la bille en cas de dérapage.

En conséquence, si le pilote observe que la bille est à gauche du plan de symétrie, le vecteur vitesse est à gauche du plan de symétrie : il faut faire tourner le nez de l'avion vers la gauche pour annuler le dérapage donc appuyer sur la

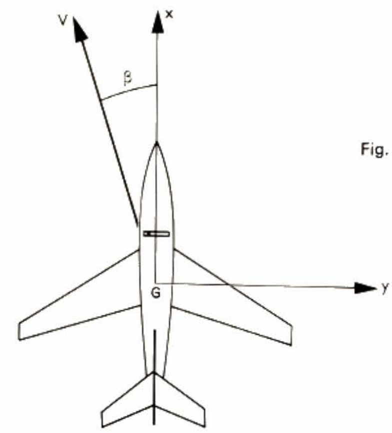


Fig. III-7 a

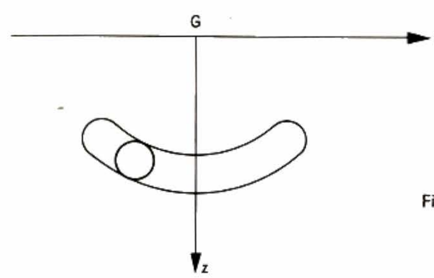


Fig. III-7 b

pédale gauche du palonnier. La figure III-7a montre la position du vecteur vitesse, l'angle de dérapage et la position de la bille vue en plan avant l'action sur le palonnier, et la figure III-7 b montre la position de la bille telle qu'elle est vue par le pilote.

Dans tout ce qui suit nous admettrons que le pilote maintient constamment le dérapage nul à l'aide de la commande de « direction » (au cours d'un vol normal le dérapage peut être provoqué soit par la turbulence soit par les évolutions de l'avion et en particulier par l'action de la commande de gauchissement ; dans ce dernier cas, le braquage différentiel des ailerons se traduit non seulement par une différence de portance des deux ailerons, mais également par une différence de traînée conduisant à un couple parasite de lacet).

La gouverne de profondeur permet au pilote de modifier l'angle d'incidence α et, par là même, de modifier la force de portance de la voilure ; mais notons bien que l'effet de variation de portance est un effet secondaire dans le temps. La force de portance étant normale à la trajectoire, le pilote, à l'aide de la gouverne de profondeur, peut ainsi agir sur la courbure de la trajectoire.

La gouverne de gauchissement permet d'incliner le plan de symétrie de l'avion, donc d'incliner la force de portance à droite ou à gauche du plan vertical. La composante horizontale de la force de portance permet alors de courber la trajectoire dans le plan horizontal, donc d'effectuer des virages. Nous reviendrons plus loin sur le virage de l'avion et nous supposerons, pour l'instant, que le pilote maintient « les ailes horizontales » ou, pour être plus rigoureux, le plan de symétrie de l'avion vertical à l'aide de la commande de gauchissement.

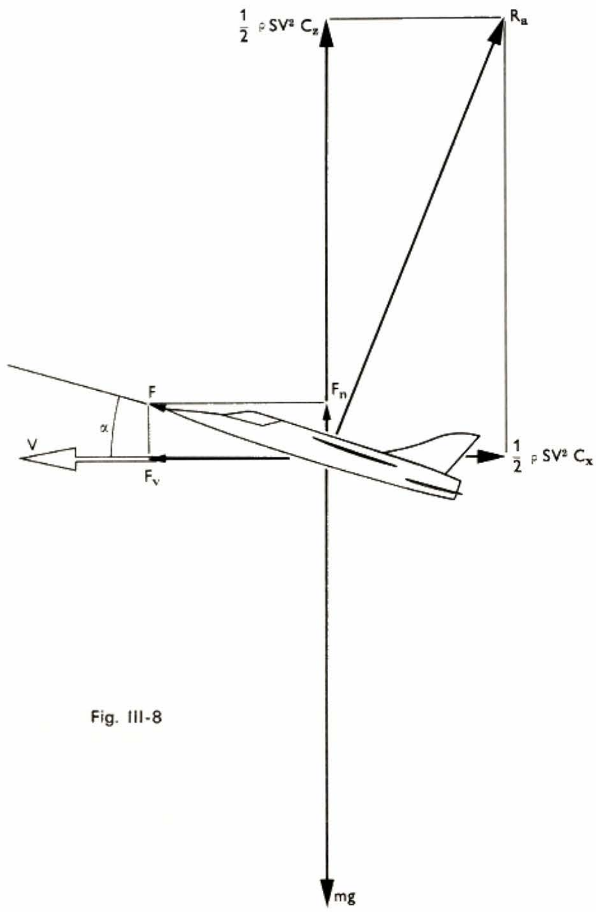


Fig. III-8

Ainsi, en supposant que le pilote maintient :

a) le dérapage nul (à l'aide du palonnier),

b) les « ailes horizontales » (à l'aide de la commande de gauchissement),

nous pouvons dire que les forces aérodynamiques se trouvent dans le plan de symétrie (hypothèse a) et que le plan de symétrie est vertical (hypothèse b).

Si la résultante des forces de propulsion se trouve également dans le plan de symétrie (hypothèse très générale), toutes les forces agissant sur l'avion, forces aérodynamiques, forces de propulsion, force de pesanteur se trouvent situées dans un même plan vertical.

La trajectoire se trouve donc située dans ce même plan vertical et le pilote dispose des deux commandes restantes, la commande de profondeur et la manette des gaz pour modifier cette trajectoire.

Dans ce cas l'étude de la trajectoire fait l'objet des paragraphes suivants.

1.3. Le vol rectiligne de l'avion. — Cherchons comment le pilote doit agir sur la commande de profondeur et la manette des gaz pour maintenir l'avion en vol rectiligne uniforme en palier, c'est-à-dire en vol rectiligne horizontal à vitesse constante.

Nous admettrons pour l'instant, comme les réflexions précédentes l'ont suggéré, que le pilote est maître de l'incidence à l'aide de la commande de profondeur.

La vitesse de l'avion est donc supposée constante et horizontale. Pour que la trajectoire reste rectiligne et la vitesse constante, il faut que la résultante des forces agissant sur l'avion soit nulle. Cette résultante se compose :

— du poids : force verticale mg dirigée vers le sol (m, masse de l'avion, g accélération de la pesanteur);

— de la force aérodynamique que l'on décompose en :

- force de portance $\frac{1}{2}\rho SV^2 C_z$
- force de traînée $\frac{1}{2}\rho SV^2 C_x$

selon la normale et la tangente à la trajectoire;

(V est la vitesse de l'avion, S la surface de référence, ρ la masse volumique de l'air, C_x et C_z les deux coefficients aérodynamiques qui ne dépendent que de l'incidence α et du nombre de Mach);

— de la force de propulsion F que nous supposerons portée par l'axe de référence du fuselage. Soit F_v la composante de F suivant la vitesse et F_n la composante de F suivant la normale à la vitesse : $F_v = F\cos\alpha$ et $F_n = F\sin\alpha$ si α est l'incidence ; en général α est faible, voisin de quelques degrés, et F_n peut être négligé en première approximation).

L'équilibre des forces (fig. III-8) conduit à :

$$F_n + \frac{1}{2}\rho C_z S V^2 - mg = 0 \tag{4}$$

$$F_v - \frac{1}{2}\rho C_x S V^2 = 0 \tag{5}$$

Ainsi la portance de la voilure (augmentée de la composante, négligeable, le plus souvent, de la poussée) équilibre le poids de l'avion ; la poussée du moteur (ou plus précisément sa composante parallèle à la vitesse) équilibre la traînée. En conséquence le pilote doit, à l'aide de la gouverne de profondeur, afficher une incidence α_0 telle que la portance qui en résulte à la vitesse V équilibre le poids mg. En négligeant F_n l'incidence est donc déterminée par la relation :

$$C_z = \frac{mg}{\frac{1}{2}\rho S V_0^2} \tag{4'}$$

Rappelons que pour les incidences usuelles C_z varie linéairement avec α :

$$C_z = C_{z0} + \frac{dC_z}{d\alpha}\alpha$$

L'incidence étant ainsi déterminée, le coefficient de traînée C_x est déterminé (polaire) et l'équation (5) fixe la poussée F_0 nécessaire pour équilibrer la traînée (et donc la position de la manette des gaz) :

$$F_0 = \frac{1}{2}\rho C_x S V_0^2$$

Nous verrons un peu plus loin comment le pilote parvient en pratique à choisir les positions correctes de ses deux commandes (profondeur et gaz) pour maintenir cet équilibre.

Regardons maintenant quelles sont les modifications apportées à ces positions de commande pour maintenir un vol rectiligne non horizontal, en montée par exemple.

Dans ce cas la vitesse fait un angle γ (angle de pente) avec l'horizontale.

En projetant les forces sur la vitesse et la normale à la vitesse, il vient, en notant que le poids mg fait alors l'angle γ avec la normale à la vitesse (fig. III-9) et en négligeant F_n :

$$\frac{1}{2}\rho C_z S V_0^2 - mg\cos\gamma = 0 \tag{6}$$

$$F - \frac{1}{2}\rho C_x S V_0^2 - mg\sin\gamma = 0 \tag{7}$$

Sauf exceptions, les pentes de montée et de descente sont voisines de quelques degrés ; il est par suite légitime de confondre cos γ avec l'unité et sin γ avec γ (exprimé en radians).

Les équations (6) et (7) deviennent alors :

$$\frac{1}{2}\rho C_z S V_0^2 - mg = 0 \tag{8}$$

$$F - \frac{1}{2}\rho C_x S V_0^2 - mg\gamma = 0 \tag{9}$$

Par conséquent, moyennant l'hypothèse des pentes faibles ($\cos\gamma \approx 1$), l'incidence est fixée par la même équation que pour le vol en palier :

$$C_z = \frac{mg}{\frac{1}{2}\rho S V_0^2}$$

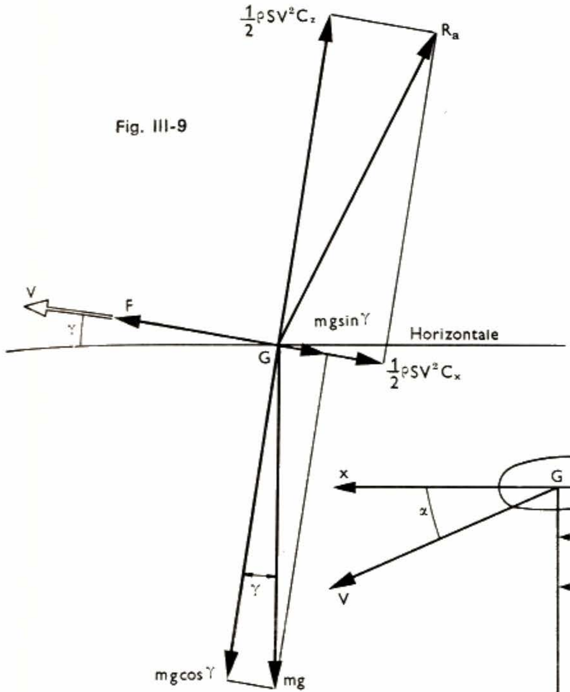


Fig. III-9

Ainsi la position du manche permettant de voler à la vitesse V_0 constante est la même en montée, en palier et en descente.

Si par ailleurs la poussée nécessaire au vol en palier stabilisé est F_0 :

$$F_0 = \frac{1}{2}\,\rho\, S\, V_0^2\, C_x$$

la poussée nécessaire pour équilibrer le vol à la pente γ ($\gamma > 0$ pour la montée) est :

$$F_\gamma = F_0 + mg\,\gamma$$

Ainsi pour monter avec une pente de 1° (soit 0,0175 radian) il faut augmenter la poussée d'une quantité égale à 1,75 % du poids de l'avion.

Avant d'étudier le pilotage proprement dit, c'est-à-dire la réponse de l'avion à des variations de position des commandes (profondeur et gaz) à partir des conditions d'équilibre, il nous faut préciser l'action de la commande de profondeur sur l'incidence.

1.4. Pilotage de l'incidence. — La relation « position de gouverne-incidence » repose sur l'équilibre des moments des diverse forces agissant sur l'avion. Le poids de l'avion a un moment nul par rapport au centre de gravité (par définition du centre de gravité). Nous supposerons par ailleurs que la poussée du moteur à un moment nul par rapport au centre de gravité (cette hypothèse ne modifie pas la généralité des résultats que nous allons obtenir, mais simplifie l'exposé.)

Seules interviennent donc les forces aérodynamiques agissant sur la voilure et sur l'empennage.

Rappelons que les forces aérodynamiques agissant sur une voilure se réduisent au foyer en un moment indépendant de l'incidence et en une résultante qui varie linéairement avec l'incidence (du moins pour les faibles incidences).

Soit Z et Z' les composantes des forces aérodynamiques agissant sur la voilure et l'empennage parallèles à l'axe de l'avion Gz ; soit M_0 le moment par rapport au foyer F des forces aérodynamiques agissant sur la voilure et M'_0 le moment par rapport au foyer F' des forces aérodynamiques agissant sur l'empennage (fig. III-10). Nous supposons que l'axe Gx passe par les deux foyers F et F', ce qui nous dispense de tenir compte des composantes X et X' des résultantes aérodynamiques. Nous allons voir que cette hypothèse ne restreint pas, elle non plus, la généralité du résultat.

Le moment des forces aérodynamiques par rapport au centre de gravité est, dans ces conditions :

$$M_a = M_0 + M'_0 - Zx_f - Z'x'_f$$

où x_f et x'_f sont les abscisses de F et F'.

Les composantes Z et Z' dépendent de l'incidence α ; Z' dépend également du braquage δ de la gouverne de profondeur.

Supposons de plus l'avion animé d'un mouvement de rotation de vitesse $q = \frac{d\Theta}{dt}$ autour du centre de gravité. Le foyer F' se déplace avec une vitesse linéaire $v = qx'_f$. La composition de la vitesse d'avancement V et de la vitesse v

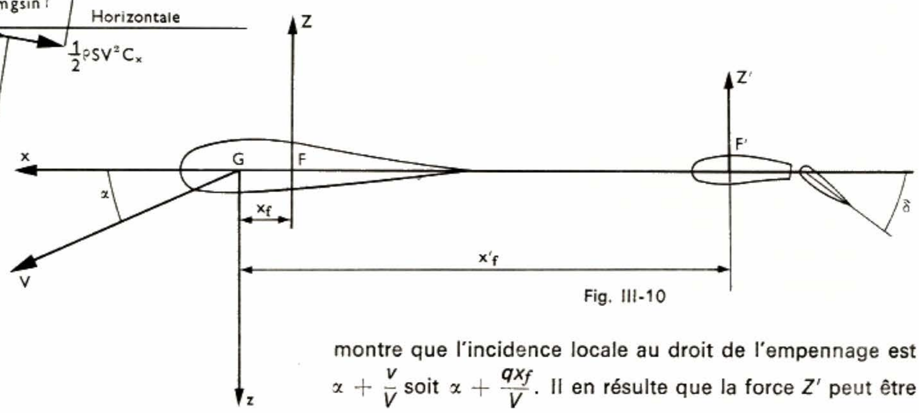


Fig. III-10

montre que l'incidence locale au droit de l'empennage est $\alpha + \frac{v}{V}$ soit $\alpha + \frac{qx_f}{V}$. Il en résulte que la force Z' peut être décomposée en une force fonction de α, une force fonction de δ, et une force fonction de $\frac{qx'_f}{V}$. Nous voyons que si q est positif (mouvement à cabrer) la composante dépendant de q est négative : elle s'oppose au mouvement. Rappelons qu'une force fonction de la vitesse et s'opposant au mouvement est une force d'amortissement. L'existence de cette force d'amortissement apparaît ainsi de façon évidente pour l'empennage. Il est également facile de concevoir que l'écoulement autour de la voilure dépende aussi de la vitesse de rotation sans que l'on puisse parler d'une augmentation globale de l'incidence ; dans le cas de la voilure, c'est l'incidence locale en chaque point de la voilure qui est modifiée lors de la rotation. Par suite, la force Z dépend également de $\frac{q}{V}$ mais d'une façon plus complexe.

En définitive nous retiendrons que Z dépend de α et $\frac{q}{V}$ et que Z' dépend de α, δ et $\frac{q}{V}$. Par conséquent, M_a dépend de α, de δ et de $\frac{q}{V}$. Par souci d'homogénéité on remplace $\frac{q}{V}$ par la grandeur sans dimension $\frac{ql}{V}$ où l est la longueur de la corde de référence de la voilure :

$$M_a = f\left(\alpha, \delta, \frac{ql}{V}\right)$$

Ainsi le coefficient de moment C_m défini par :

$$M_a = \frac{1}{2}\,\rho\, Sl\, V^2\, C_m$$

peut s'écrire :

$$C_m = C_{m0} + \frac{\partial C_m}{\partial \alpha}\,\alpha + \frac{\partial C_m}{\partial \delta}\,\delta + \frac{\partial C_m}{\partial q}\,\frac{ql}{V} \qquad (10)$$

en admettant qu'il est possible de linéariser la relation $C_m\left(\alpha, \delta, \frac{ql}{V}\right)$ pour les petites variations de α, δ et q.

Il est bien entendu que les considérations développées pour en arriver à la relation (10) ne constituent pas une démonstration ; elles n'ont pour objet que de faire apparaître la nature physique du phénomène. Seule l'expérience acquise au cours des études en soufflerie permet de montrer qu'il est légitime d'écrire C_m sous la forme ci-dessus avec une bonne approximation.

Dans ces conditions l'équation du mouvement autour du centre de gravité s'écrit (V. relation 3) : (11)

$$B\frac{d^2\Theta}{dt^2} = \frac{1}{2}\rho S l V^2 \left(C_{m0} + \frac{\partial C_m}{\partial\alpha}\alpha + \frac{\partial C_m}{\partial\delta}\delta + \frac{\partial C_m}{\partial q}\frac{d\Theta}{dt}\cdot\frac{l}{V}\right)$$

où B est le moment d'inertie de l'avion autour de la normale G_y au plan de symétrie de l'avion.

Nous noterons que dans la relation (11) figurent l'angle d'assiette longitudinale θ et l'angle d'incidence α liés par la relation géométrique (fig. III-11).

$$\Theta = \alpha + \gamma \qquad (12)$$



Fig. III-11

Ainsi l'étude du mouvement de l'avion autour du centre de gravité ne peut se faire indépendamment de celle du mouvement du centre de gravité puisque dans l'équation (11) θ et α sont liés par la relation (12) où figure γ déterminé par les équations de force.

Néanmoins nous constatons qu'à l'équilibre :

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d\theta}{dt} = 0$$

et α et δ sont liés par :

$$C_m = C_{m0} + \frac{\partial C_m}{\partial\alpha}\alpha + \frac{\partial C_m}{\partial\delta}\delta = 0 \qquad (13)$$

Ainsi à chaque position δ de la gouverne de profondeur correspond une incidence d'équilibre, comme nous l'avions laissé entendre plus haut.

Nous allons voir que la relation (13) définit l'existence d'un foyer pour l'ensemble de l'avion.

Supposons qu'il existe un point F_A où l'ensemble des forces aérodynamiques pour une position déterminée de gouverne, se réduit à un moment résultant M''_0 indépendant de l'incidence et une résultante générale, fonction linéaire de l'incidence. Le calcul du moment au centre de gravité donne :

$$M_a = M''_0 - x_{FA}\cdot\frac{1}{2}\rho S V^2 \frac{\partial C_z}{\partial\alpha}\alpha$$

ou encore, en utilisant des coefficients sans dimensions ce qui conduit à diviser les deux membres par $\frac{1}{2}\rho S l V^2$

$$C_m = C''_{m0} - \frac{x_{FA}}{l}\frac{\partial C_z}{\partial\alpha}\alpha$$

En identifiant avec la relation (13) il vient

$$C''_{m0} = C_{m0} + \frac{\partial C_m}{\partial\delta}$$

$$\frac{\partial C_m}{\partial\alpha} = -\frac{x_{FA}}{l}\frac{\partial C_z}{\partial\alpha}$$

ce qui montre l'existence du point F_A.

Supposons que le centre de gravité soit situé en avant du foyer F_A. À l'équilibre le moment C_m est nul. Supposons que, sous l'effet d'une rafale par exemple, l'incidence α augmente. Il en résulte une augmentation ΔZ de la force de portance qui se situe au foyer (puisque le moment des forces aérodynamiques par rapport au foyer est constant, les variations de portance avec l'incidence doivent passer par le foyer). Comme le montre clairement la figure III-12, le moment qui en résulte est piqueur. Ainsi toute augmentation d'incidence se traduit par l'apparition d'un moment piqueur s'opposant à cette augmentation d'incidence. En conséquence l'équilibre d'incidence est stable puisque, pour tout écart par rapport à l'équilibre, apparaît un moment tendant à ramener l'avion à l'équilibre. On pourrait voir de même que, si le centre de gravité se situe derrière le foyer, l'équilibre devient instable.

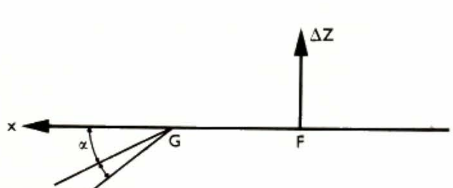


Fig. III-12

Nous ne pouvons nous étendre plus longuement sur ce problème de stabilité ; nous retiendrons seulement que l'équilibre longitudinal de l'avion n'est stable que si le centre de gravité de l'avion se trouve situé en avant du foyer avion. On repère généralement la position du foyer et du centre de gravité par leur position par rapport à la corde de référence de la voilure.

La distance entre le bord d'attaque de la corde de référence et le centre de gravité, exprimée en pourcentage de cette corde, est appelée *centrage*.

Pour un avion subsonique à aile rectangulaire, le foyer est situé généralement à 25 %.

Le centrage doit donc être inférieur à 25 %.

Plus le centre de gravité se trouve en avant du foyer plus l'équilibre devient stable. En revanche, la variation de position de gouverne nécessaire pour obtenir une variation donnée d'incidence augmente lorsque la distance foyer-centre de gravité augmente ; en effet la relation (13) appliquée à des variations autour de l'équilibre α_0, δ_0 donne

$$\delta - \delta_0 = -\frac{\dfrac{\partial C_m}{\partial\alpha}}{\dfrac{\partial C_m}{\partial\delta}}(\alpha - \alpha_0)$$

et $\frac{\partial C_m}{\partial\alpha}$ varie linéairement avec x_f.

Par conséquent, un centrage trop avant limite les possibilités de variation de l'angle d'incidence, le débattement de la gouverne de profondeur étant nécessairement limité.

En définitive le centrage d'un avion est limité pour deux raisons :

— vers l'arrière pour des raisons de stabilité,

— vers l'avant pour des raisons de possibilité de manœuvre.

Nous venons d'étudier l'équilibre d'incidence et la stabilité de cet équilibre ; que se passe-t-il lorsque partant d'un état d'équilibre α_0, δ_0 le pilote affiche une position de gouverne δ différente de δ_0. Seule l'équation différentielle (11) peut nous fournir la réponse associée à la relation géométrique (12) et aux deux équations de force (notons que nous n'avons écrit jusqu'à présent que les équations de force correspondant au mouvement rectiligne uniforme ; nous verrons les équations générales du mouvement au paragraphe suivant).

Uniquement pour expliquer l'allure du phénomène, nous allons faire une hypothèse simplificatrice qui se révèle erronée dès que nous cherchons une application quantitative, mais qui est valable sur le plan qualitatif.

Nous avons vu plus haut que l'action sur les gouvernes avait pour premier effet de modifier les moments mais non les forces. Nous allons donc supposer que la variation de position de la gouverne, de la position δ_0 (incidence α_0, vitesse V_0 satisfaisant à l'équation de portance) à la position δ ne conduit pas, dans les quelques secondes qui suivent à une modification des forces donc à une courbure de la trajectoire ou à une variation de vitesse $\left(\frac{d\gamma}{dt} = 0,\ \frac{dV}{dt} = 0\right)$. Par conséquent, dans cette hypothèse très approximative, notons le bien,

$$q = \frac{d\Theta}{dt} = \frac{d\alpha}{dt}$$

puisque $\frac{d\gamma}{dt} = 0$.

L'équation (11) se réduit donc à une équation différentielle du second ordre en α :

$$B \frac{d^2\alpha}{dt^2} - \frac{1}{2} \rho S l V^2 \frac{\partial C_m}{\partial q} \frac{d\alpha}{dt} - \frac{1}{2} \rho S l V^2 \frac{\partial C_m}{\partial \alpha} \alpha = \frac{1}{2} \rho S l V^2 \left(C_{m0} + \frac{\partial C_m}{\partial \delta} \delta \right)$$

En tenant compte de la relation d'équilibre:

$$C_{m0} + \frac{\partial C_m}{\partial \alpha} \alpha_0 + \frac{\partial C_m}{\partial \delta} \delta_0 = 0$$

et en posant:

$$\bar{\alpha} = \alpha - \alpha_0$$
$$\bar{\delta} = \delta - \delta_0$$
$$B' = \frac{B}{\frac{1}{2} \rho S l V^2}$$

il vient:

$$B' \frac{d^2\bar{\alpha}}{dt^2} - \frac{\partial C_m}{\partial q} \frac{l}{V} \frac{d\bar{\alpha}}{dt} - \frac{\partial C_m}{\partial \alpha} \bar{\alpha} = \frac{\partial C_m}{\partial \delta} \bar{\delta}$$

Nous sommes en présence d'une classique équation différentielle linéaire du second ordre. La réponse à un échelon de gouverne $\bar{\delta}$ (variation brusque de $\bar{\delta}$) est donc la somme d'une solution particulière de l'équation avec second membre (c'est-à-dire la solution $\bar{\alpha} =$ Cte telle que $-\frac{\partial C_m}{\partial \alpha} \bar{\alpha} = \frac{\partial C_m}{\partial \delta} \bar{\delta}$ qui correspond à l'équilibre final) et la solution générale de l'équation sans second membre qui, rappelons-le, est en général un mouvement oscillatoire. Ce mouvement est en pratique toujours amorti (nous avons vu que le terme $\frac{\partial C_m}{\partial q} \frac{d\alpha}{dt}$ correspond bien à un effet amortissant). En conséquence, nous retiendrons que le passage à une nouvelle incidence d'équilibre par variation de position de la gouverne se fait par l'intermédiaire d'une oscillation qui est en général très amortie, et dont la période, pour les avions conventionnels, est voisine de la seconde.

Les considérations développées ci-dessus ne permettent pas de calculer période et amortissement du mouvement car l'hypothèse $\frac{d\gamma}{dt} = 0$ est trop approximative. Nous avons supposé l'avion « embroché » sur son axe G_y maintenu fixe et nous avons étudié les oscillations de la « girouette » ainsi constituée. Dans la pratique, l'axe G_y est soumis, du fait des modifications des forces aérodynamiques, à un mouvement lui aussi oscillatoire que nous ne pouvons étudier ici, à fond.

L'oscillation d'incidence étant un phénomène oscillatoire de période courte et d'amortissement important en général (il passe totalement inaperçu de la part du pilote), nous admettrons dans les paragraphes qui suivent qu'à chaque position de gouverne correspond en pratique la position d'équilibre d'incidence donnée par:

$$C_{m0} + \frac{\partial C_m}{\partial \alpha} \alpha_0 + \frac{\partial C_m}{\partial \delta} \delta_0 = 0$$

en négligeant totalement le phénomène transitoire.

Cette hypothèse va nous permettre d'aborder le paragraphe suivant en supposant que le pilote dispose de deux paramètres pour agir sur la trajectoire, la poussée F et l'incidence α (en pratique, la manette des gaz et la position longitudinale du manche).

1.5. Modification de la trajectoire

1.5.1. Mise en montée ou en descente. Accélération. — Nous avons écrit, jusqu'à présent, les équations de force dans le cas du mouvement rectiligne uniforme. Dans le cas général du mouvement, la résultante des forces aérodynamiques, des forces de propulsion et des forces de pesanteur est égale à $m\vec{\Gamma}$ où $\vec{\Gamma}$ est le vecteur accélération.

Nous avons vu que les composantes de $\vec{\Gamma}$ sur la vitesse et sur la normale à la vitesse sont $\frac{dV}{dt}$ et $\frac{V^2}{R}$ où R est le rayon de courbure. Il est commode d'exprimer R en fonction de la dérivée de la pente γ:

$$R = \frac{V}{\frac{d\gamma}{dt}}$$

Par suite:

$$\frac{V^2}{R} = V \cdot \frac{d\gamma}{dt}$$

En conséquence les deux équations de force s'écrivent:

$$m \frac{dV}{dt} = F - \frac{1}{2} \rho C_x S V^2 - mg\gamma \quad (14)$$

$$mV \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{2} \rho C_z S V^2 - mg \quad (15)$$

(en faisant comme ci-dessus les approximations suivantes: $\cos \gamma = 1$, $\sin \gamma = \gamma$, $F \cos \alpha = F$, $F \sin \alpha = 0$)

Supposons que le pilote ait affiché l'incidence α_0 et la poussée F_0 conduisant au vol en palier rectiligne à la vitesse V_0:

$$F_0 - \frac{1}{2} \rho C_{x0} S V_0^2 = 0 \quad (16)$$

$$\frac{1}{2} \rho C_{z0} S V_0^2 - mg = 0 \quad (17)$$

où C_{z0} et C_{x0} sont les valeurs de C_z et C_x pour l'incidence α_0

Que va-t-il se passer si le pilote affiche une poussée F différente de F_0, par exemple supérieure, tout en maintenant, à l'aide du manche, l'incidence à la valeur α.

Les équations du mouvement s'écrivent alors:

$$m \frac{dV}{dt} = F - \frac{1}{2} \rho C_{x0} S V^2 - mg\gamma \quad (18)$$

$$mV \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{2} \rho C_{z0} S V^2 - mg \quad (19)$$

puisque C_x et C_z sont constants.

Par soustraction des équations (16) et (18) d'une part et (17) et (19) d'autre part, il vient:

$$m \frac{dV}{dt} = F - F_0 - \frac{1}{2} \rho C_{x0} S (V^2 - V_0^2) - mg\gamma \quad (20)$$

$$m V \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{2} \rho C_{z0} S (V^2 - V^2_0) \quad (21)$$

Les conditions de vol stabilisées $\left(\frac{dV}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} = 0\right)$, c'est-à-dire les conditions d'équilibre final, sont donc:

- une vitesse égale à [équation (21)]:

$$V_1 = V_0$$

- et une accélération γ_1 telle que [équation (20)]:

$$mg\,\gamma_1 = F - F_0$$

c'est-à-dire si F est supérieure à F_0 une montée (pente γ_1) à même vitesse V_0.

Comment l'avion passe-t-il des conditions initiales à l'équilibre final? L'équation (20) montre qu'à l'instant initial ($V = V_0$, $\gamma = 0$) apparait une accélération $\left(\frac{dV}{dt}\right)_0$ donnée par:

$$m \left(\frac{dV}{dt}\right)_0 = F - F_0$$

De même l'équation (21) montre que la courbure initiale de la trajectoire est nulle $\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_0 = 0$.

L'accélération sur trajectoire conduit à une augmentation de vitesse ce qui provoque (V. équation 21) la courbure de la trajectoire $\left(\frac{d\gamma}{dt} > 0\right)$. L'augmentation résultante de la pente γ provoque (équation 20) une diminution de l'accélération $\frac{dV}{dt}$.

Nous n'allons pas intégrer ainsi pas à pas le système d'équations (20) et (21). Retenons simplement les résultats suivants qui peuvent être retrouvés très simplement en éliminant $V - V_0$ ou γ entre les deux équations (20) et (21).

Sur une augmentation de poussée $F - F_0$ à incidence maintenue constante,

a) le mouvement initial de l'avion est une accélération sans courbure de trajectoire ;

b) l'équilibre final atteint au bout d'un temps théoriquement infini est un vol en montée stabilisée à même vitesse V_0 sous une pente γ_1, déterminée par :

$$F - F_0 = mg\,\gamma_1$$

c) le passage de l'état initial à l'état final se fait par l'intermédiaire d'une oscillation, dite oscillation phygoïde, de la vitesse et de la pente (et donc de la trajectoire).

En pratique, la mise en montée de l'avion ne s'effectue pas à incidence constante. Pourquoi attendre en effet que la courbure de la trajectoire résulte de l'augmentation de vitesse, puisqu'en définitive la vitesse stabilisée sera la même que la vitesse initiale. Par conséquent la mise en montée s'effectue de la façon suivante : le pilote augmente la poussée et en même temps augmente l'incidence sensiblement de façon à maintenir l'accélération $\frac{dV}{dt}$ nulle. (L'augmentation d'incidence se traduit par une augmentation de C_x, donc une augmentation de traînée, qui dans l'équation (14) compense l'augmentation de poussée).

L'augmentation d'incidence (voir équation 15) provoque une augmentation de portance permettant une courbure de la trajectoire $\left(\frac{d\gamma}{dt} > 0\right)$. Comme la pente γ augmente, le pilote est conduit à diminuer progressivement l'incidence (relation 14) s'il veut maintenir la vitesse constante $\left(\frac{dV}{dt} = 0\right)$.

En pratique, le pilote pousse sur la manette des gaz et tire sur le manche (augmentation d'incidence) en surveillant l'anémomètre (indicateur de vitesse). Si la vitesse a tendance à augmenter il tire plus, si elle a tendance à diminuer il « rend la main » c'est-à-dire relâche son effort à tirer.

L'opération de mise en descente est analogue : diminution de la poussée et corrélativement diminution de l'incidence pour éviter la décélération.

Suite à une augmentation de poussée, le pilote peut également chercher à maintenir le palier, c'est-à-dire accélérer ; il lui faut donc maintenir nulle la courbure de la trajectoire $\left(\frac{d\gamma}{dt} = 0\right)$ c'est-à-dire assurer, au cours de l'augmentation de vitesse, l'égalité de la portance et du poids. La vitesse augmentant, la portance est maintenue constante par le pilote par diminution de l'incidence en respectant la loi :

$$C_z = \frac{mg}{\frac{1}{2}\rho SV^2}$$

En pratique, le pilote observe l'altimètre ; si l'altitude a tendance à augmenter $\left(\frac{d\gamma}{dt} > 0\right)$ le pilote diminue l'incidence (il pousse sur le manche) ; si elle a tendance à diminuer $\left(\frac{d\gamma}{dt} < 0\right)$ le pilote relâche son effort « à piquer ». Nous avons à dessein parlé d'effort à piquer, pour rappeler que l'action du manche a pour effet une variation d'incidence et non obligatoirement une variation de pente ; dans le cas d'une accélération en palier, la trajectoire, par hypothèse, reste rectiligne et l'incidence, sous l'action du pilote, diminue : donc le « nez » s'abaisse sur l'horizon.

La décélération en palier s'opère de façon analogue : diminution de poussée et maintient de l'altitude par augmentation progressive de l'incidence au cours de la décélération. Nous reviendrons sur ce point au paragraphe suivant.

1.5.2. Le virage. — Nous avons vu jusqu'ici les évolutions dans le plan vertical en supposant que le pilote maintenait le dérapage nul et les ailes horizontales.

Que se passe-t-il maintenant si, à l'aide des ailerons, le pilote incline son avion latéralement tout en maintenant toujours le dérapage nul. Nous avons vu que le braquage des ailerons provoquait un couple de roulis mais également un moment de lacet (les traînées des deux ailes ne sont plus égales) ; le pilote doit donc compenser ce moment de lacet à l'aide de la gouverne de direction pour maintenir le dérapage nul. Cette différence de traînée, due au braquage différentiel des ailerons, n'est pas, loin de là, le seul phénomène conduisant à l'apparition d'un angle de dérapage. Il n'est pas question ici d'étudier le comportement de l'avion en latéral ; cette étude est relativement complexe et nécessite des développements mathématiques sortant du cadre de cet article et, par ailleurs, non indispensables à la simple compréhension des phénomènes. Nous nous contenterons donc de supposer que le pilote maintient en permanence le dérapage nul lors des évolutions de l'avion ; par conséquent les forces aérodynamiques restent constamment situées dans le plan de symétrie.

L'avion étant en vol rectiligne uniforme à la vitesse V_0 (donc à l'incidence α_0 nécessaire pour que la portance équilibre le poids), le pilote incline latéralement les ailes, par exemple abaisse l'aile gauche, en maintenant la même incidence à l'aide du manche. Que se passe-t-il ?

Sur la figure III-13, où l'avion est représenté vu de l'avant, on constate que la portance, située dans le plan de symétrie de l'avion est sortie du plan vertical.

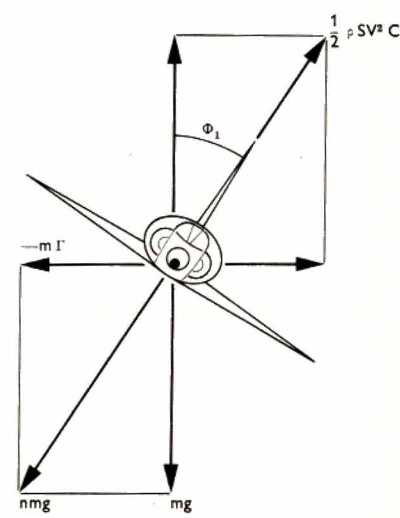


Fig. III-13

Par conséquent, la composante horizontale de la portance courbe la trajectoire vers la gauche et la composante verticale n'équilibre plus le poids de l'avion, ce qui conduit également à une courbure de la trajectoire vers le bas.

Si le pilote veut maintenir sa trajectoire dans le plan horizontal initial, il lui faut donc augmenter la portance, donc l'incidence, de telle sorte que la composante verticale de la portance équilibre le poids.

Si Φ_1 est l'angle d'inclinaison du plan de symétrie par rapport au plan vertical le pilote doit afficher une incidence telle que :

$$\frac{1}{2}\rho SV_0^2 C_z \cos\Phi_1 = mg \tag{22}$$

alors qu'en vol en palier rectiligne, l'incidence d'équilibre α_0 était donnée par :

$$\frac{1}{2}\rho SV_0^2 C_{z0} = mg$$

Ainsi :

$$\frac{C_z}{C_{z0}} = \frac{1}{\cos\Phi_1}$$

La portance doit être multipliée par un facteur n, dit facteur de charge tel que :

$$n = \frac{1}{\cos\Phi_1} \tag{23}$$

La portance en virage est donc égale à $n\,mg$.

Cette portance équilibre la somme géométrique du poids $\vec{mg}$ et de la force d'inertie $-m\vec{\Gamma}$.

Toute masse μ liée à l'avion est soumise à son poids $\vec{\mu g}$ et à la force d'inertie $-\mu\vec{\Gamma}$ (équilibrées par la réaction $\vec{T}$ d'attache de la masse à l'ensemble de l'avion). La masse μ est donc soumise à une réaction $\vec{T} = -n\vec{\mu g}$, parallèle à la portance (donc parallèle au plan de symétrie) ; la force $n\vec{\mu g}$ constitue le poids apparent de la masse. Supposons, par exemple, que l'avion soit incliné d'un angle Φ_1 de 60°

$$n = \frac{1}{\cos 60°} = 2$$

Le pilote sera alors soumis à une force, somme de son poids et de la force d'inertie, égale à deux fois son poids en vol rectiligne. Cette force, parallèle au plan de symétrie est équilibrée par la réaction du siège sur le pilote.

Si le pilote ne maintient pas le dérapage nul, la force de portance n'est plus située dans le plan de symétrie. Par suite, la réaction du siège sur le pilote n'est plus parallèle au plan de symétrie et le pilote se sent déporté sur son siège.

Sur les avions de transport les pilotes ont pour consigne de ne pas incliner les virages à plus de 30° ce qui conduit à un facteur de charge maximal de $1/\cos 30° \approx 1{,}15$ ce qui n'est pas gênant pour les passagers qui ne remarquent pratiquement pas le changement de poids apparent (l'homme est plus sensible aux variations du facteur de charge qu'au facteur de charge lui-même, du moins pour ces faibles valeurs).

En revanche, avec les avions de chasse, lors de virages serrés les facteurs de charges atteignent des valeurs plus grandes. Des troubles de la vision apparaissent vers $n = 4$ (perte de la vision périphérique et perte de la vision des couleurs) et vont jusqu'à la cécité complète pour n voisin de 6 (ces chiffres varient d'ailleurs suivant les individus, leur entraînement et leur état de santé).

Quel est maintenant le rayon de virage obtenu ?

Le rayon de courbure est dû, nous l'avons vu, à la composante horizontale de la portance.

Par suite : $$\frac{1}{2}\rho C_z S V^2 \sin \Phi_1 = m\frac{V^2}{R}$$

En tenant compte de ce que :

$$\frac{1}{2}\rho C_z S V^2 \cos \Phi_1 = mg$$

il vient :

$$\operatorname{tg} \Phi_1 = \frac{V^2}{Rg} \qquad (24)$$

$$R = \frac{V^2}{g}\frac{1}{\operatorname{tg} \Phi_1} = \frac{V^2}{g}\sqrt{n^2 - l} \qquad (25)$$

Ainsi, un petit avion de tourisme volant à 50 m/s et virant à 30° et 60° a un rayon de virage de 433 m et 144 m.

Un avion supersonique volant à 600 m/s avec les mêmes inclinaisons a des rayons de virage de 62,4 km et 20,8 km.

Notons bien que dans les deux cas, 50 ou 600 m/s, les facteurs de charge sont les mêmes (soit 1,15 et 2) : ce sont les rayons de virage qui augmentent avec la vitesse.

Nous n'avons pas encore considéré l'équation de propulsion. Étant donné que le pilote a augmenté la portance pour maintenir le palier, la traînée est également augmentée. Par conséquent, si le pilote veut maintenir également la vitesse, il doit équilibrer la nouvelle traînée en augmentant la poussée.

Remarquons que lorsque le pilote veut effectuer des virages de plus en plus serrés, en palier, il est conduit à augmenter de plus en plus la portance et, par là même, la poussée. Il existe une inclinaison limite correspondant à la poussée maximale disponible du moteur ; au-delà de cette inclinaison il n'est plus possible d'effectuer un virage en palier à une vitesse maintenue constante.

Le facteur de charge correspondant est appelé marge de manœuvre de l'avion.

Nous venons de rencontrer une limitation des possibilités de virage due à la propulsion. Une autre limitation, beaucoup plus importante, sera étudiée au paragraphe suivant.

1.6. Limitation du domaine de vol

1.6.1. Limitations à basse vitesse. — Lorsque le pilote augmente l'incidence à l'aide de la commande de profondeur :

a) *lors d'une décélération en vol rectiligne,*
b) *lors d'une mise en montée* (ressource),
c) *lors d'un virage stabilisé,*

il risque de rencontrer l'incidence pour laquelle se produit le décrochage de la voilure ; dans ce cas, la portance chute brutalement et généralement sur une aile avant l'autre (surtout s'il y a un peu de dérapage). Cette chute de portance se traduit par une abatée si les deux ailes décrochent de façon symétrique, ou par un départ en rotation de roulis si le décrochage est dissymétrique. Dans ce dernier cas, en général, l'avion se met en vrille, rotation plus ou moins rapide de l'avion en roulis et lacet autour du vecteur vitesse qui, assez rapidement, tend vers une direction verticale. Nous ne pouvons étudier ici le problème de la vrille ; l'action des gouvernes au cours de la vrille ne peut être prévue par les raisonnements simples effectués jusqu'ici car les écoulements sont décrochés. Seuls des essais en souffleries (souffleries spéciales à veine verticale où l'on fait vriller des maquettes en vol libre) et des essais en vol permettent de préciser les consignes de sortie de vrille. Sur les petits avions à voilure droite, la sortie de vrille s'obtient en mettant du pied à fond en sens contraire de la vrille. Sur les avions du type delta, la gouverne de direction est inefficace (la direction est masquée par la voilure aux très grandes incidences) : en général, la sortie de vrille est obtenue en braquant le manche à fond en gauchissement dans le sens de la vrille. Mais il faut retenir que de nombreuses exceptions à ces règles peuvent se rencontrer.

Revenons au cas du décrochage précédant, ou non, une vrille. Ce phénomène limite le domaine de vol vers les basses vitesses. Si α_{max} est l'incidence maximale pour laquelle apparaît le décrochage de la voilure, $C_{z\max}$ la valeur de C_z correspondant à α_{max}, la vitesse minimale V_s en palier rectiligne est donnée par :

$$mg = \frac{1}{2}\rho S C_{z\max} V_s^2 \qquad (26)$$

(l'indice s est justifié par le terme anglais *stall* qui signifie décrochage).

Un peu avant d'atteindre α_{max} au cours d'une décélération, le pilote est en général averti de cette limite par l'apparition de phénomènes vibratoires dus à des décrochages locaux et connus sous le nom de *buffeting*. Le *buffeting* augmente en général d'intensité jusqu'au décrochage. Ce phénomène avertisseur est très utile au pilote pour éviter de se mettre en « perte de vitesse » phénomène d'autant plus dangereux que l'on est au voisinage du sol. Dans les cas où ce phénomène aérodynamique naturel n'existe pas, l'approche du décrochage est signalé au pilote par divers systèmes d'alarme : klackson, lampe clignotante ou mieux, système secouant le manche et reproduisant artificiellement pour le pilote le phénomène de *buffeting* (ce système est connu sous le nom de *stick shaker*, c'est-à-dire « secoueur de manche »). En revanche, si l'avion est en évolution en virage ou en ressource, l'incidence à une vitesse V donnée est supérieure à l'incidence de vol rectiligne. Lorsque le facteur de charge est n (ce qui signifie que la portance est nmg, l'excès de portance $(n-1)\,mg$ servant soit à effectuer le virage, soit à effectuer la ressource) l'incidence à la vitesse V est donnée par :

$$\frac{1}{2}\rho S V^2 C_z = nmg$$

et la vitesse minimale V_{sn} autorisée au facteur de charge n est fournie par la relation :

$$\frac{1}{2}\rho S C_{z\max} V_{sn}^2 = nmg \qquad (27)$$

En conséquence :

$$V_{sn} = V_s\sqrt{n} \qquad (28)$$

Ainsi la vitesse minimale au facteur de charge 4 est double de la vitesse minimale en vol rectiligne en palier.

Afin de diminuer les vitesses minimales d'utilisation, en

particulier pour l'atterrissage (longueur de roulement), les ailes sont munies de volets qui ont l'un des deux rôles suivants, ou les deux simultanément, lorsqu'ils sont mis en service :

— augmenter la surface de la voilure,
— augmenter la courbure du profil de voilure.

Une modification supplémentaire de courbure peut être également obtenue par l'utilisation des becs de bord d'attaque. La figure III-14 donne un exemple de voilure comportant des volets doubles à recul et des becs de bord d'attaque.

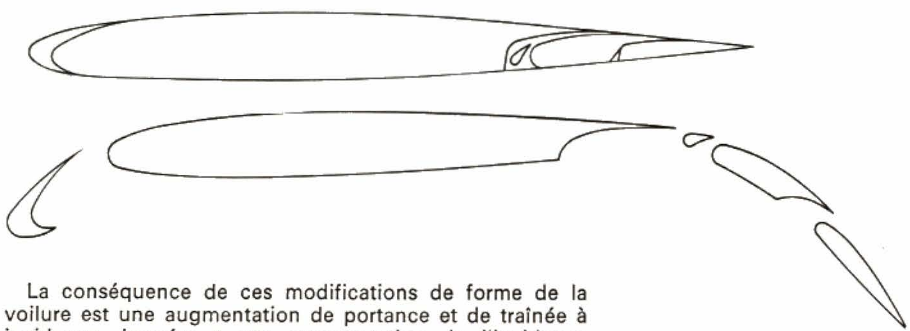


Fig. III-14

La conséquence de ces modifications de forme de la voilure est une augmentation de portance et de traînée à incidence donnée et une augmentation de l'incidence maximale. Pour les vitesses de croisière il est inutile de disposer de grandes portances. En revanche, on a intérêt à diminuer les traînées. Par conséquent, les volets et becs sont rentrés en configuration de croisière.

Afin de disposer d'une marge de sécurité suffisante vis à vis du décrochage, les vitesses d'approche des avions sont choisies en général égales à 1,3 fois la vitesse de décrochage en palier, dans les mêmes conditions de chargement. Insistons sur ce dernier point : la relation (27) montre clairement que la vitesse de décrochage est proportionnelle à la masse de l'avion. Or, sur certains avions long courrier la masse à l'atterrissage peut être inférieure de 40 à 50 % à la masse au décollage, ce qui conduit à une variation de 20 à 30 % de la vitesse de décrochage.

La marge de 30 % par rapport à la vitesse de décrochage est utile pour trois raisons :

— Elle permet au pilote de laisser varier la vitesse autour de la vitesse recommandée sans rencontrer le décrochage ; ces excursions de vitesses sont dues à l'imprécision du pilotage (le pilote ne peut garder l'œil fixé sur l'anémomètre !), à l'imprécision de l'anémomètre lui-même.

— Elle permet à l'avion de subir des accroissements d'incidence dus à la pénétration dans des rafales verticales (si l'avion, volant à la vitesse V, pénètre dans une rafale verticale de vitesse w dirigée vers le haut, son incidence augmente de $\frac{w}{V}$ en première approximation).

— Elle permet au pilote d'effectuer des manœuvres (ressources ou virages) pour modifier la trajectoire d'approche (alignement avec la piste, remise de gaz, « évitement » d'un obstacle).

Ce rapport de 1,3 entre la vitesse d'approche stabilisée et la vitesse de décrochage signifie un rapport de $1{,}3^2 \approx 1{,}7$ entre les coefficients C_z maximal et C_z d'approche.

Pour un avion de la génération actuelle des avions de transport, C_z maximal en approche est voisin de 2,5 et $\frac{dC_z}{d\alpha}$ est proche de 0,1 par degré. En conséquence, C_z d'approche atteint 2,5/1,7 soit 1,5 et la marge d'incidence $\dfrac{C_{z\max} - C_{z\text{app}}}{\dfrac{dC_z}{d\alpha}}$ est de 10 degrés. Pour une vitesse d'approche voisine de 60 m/s (ce qui correspond à une charge alaire mg/S de $\frac{1{,}225}{2} \times 60^2 \times 1{,}5 = 3308$ N/m²) la rafale maximale que l'avion peut encaisser sans décrocher est donc proche de $60 \times \text{tg}10° \approx 10$ m/s. De plus, le facteur de charge maximal disponible en approche est de 1,7, ce qui, pour fixer les idées, correspond à un virage stabilisé incliné à 54°, et à 60 m/s à un rayon de virage de 267 m (V. formules 23 et 25).

1.6.2. Limitations à grande vitesse. — Les limitations de vitesse sont de trois ordres :

a) *Limitation d'origine structurale* (efforts aérodynamiques). — Lorsque la vitesse augmente les efforts aérodynamiques exercés sur la structure augmentent. Au-delà d'une vitesse déterminée apparaissent des ruptures d'éléments de structure. À chaque configuration d'avion correspond donc une vitesse maximale autorisée, inférieure, bien entendu, à la vitesse de rupture.

Ainsi il existe une vitesse maximale autorisée en configuration décollage (train sorti et volets en position décollage), une vitesse maximale autorisée en configuration atterrissage (train sorti, volets en position atterrissage), une vitesse maximale autorisée en croisière.

b) *Limitation d'origine aérodynamique.* — L'approche de la vitesse du son se traduit par l'apparition de chocs sur la voilure et les empennages. Sur les voilures assez épaisses des avions subsoniques, ces chocs produisent des modifications importantes des écoulements allant jusqu'au décrochage de la voilure ; de nombreux phénomènes annexes interviennent avant le décrochage proprement dit : *buffeting*, modification de la position du foyer (donc changement de stabilité), modification des efforts aux commandes, accroissement très important de la traînée. Cet accroissement de traînée a été appelé « mur du son » ; pour franchir le « mur » les avions expérimentaux et les prototypes des années 50 devaient piquer à la verticale pour ajouter le poids à la poussée et vaincre ainsi la traînée.

Les avions de transport subsoniques actuellement en service (Caravelle, Boeing 707, DC8, Boeing 747, Mystère 20 et ceux de la nouvelle génération Airbus, Mercure) sont limités à des nombres de Mach inférieurs à 1 : les études aérodynamiques, l'amélioration des techniques de construction permettant de bâtir des ailes plus minces, ont permis d'augmenter le nombre de Mach critique : ainsi le Caravelle est limité à 0,8 alors que le Boeing 747 est limité à 0,89.

Sur les avions supersoniques, les phénomènes critiques rencontrés au voisinage de Mach 1 sont très diminués grâce à l'emploi de voilures très minces ; l'aile delta permet d'obtenir des profils ayant une épaisseur absolue suffisante (surtout à la liaison aile-fuselage), avec une épaisseur relative faible (épaisseur absolue rapportée à la longueur du profil). Ces avions peuvent donc atteindre sans troubles les vitesses supersoniques. Ils rencontrent alors les limitations du troisième type (ou du premier).

c) *Deuxième limitation d'origine structurale* (température de structure). — Lorsque la vitesse augmente, (et donc le nombre de Mach), la température des bords d'attaque de la voilure, des entrées d'air, des aubes des compresseurs et du nez de l'avion augmente suivant la loi :

$$T_i = T(1 + 0{,}2\,M^2)$$

où T est la température atmosphérique.

Au-dessus de 11 000 m, la température est de 216,5 K (soit — 56,5 °C). Ainsi les températures d'impact sont les suivantes lorsque le nombre de Mach augmente :

M	0,4	0,8	1	1,4	1,8	2	2,5	3
T_i (K)	223,5	244	260	301	357	390	487	606
T_i (°C)	- 49,5	- 29	-13	28	84	117	214	333

Il existe un nombre de Mach au-delà duquel l'avion ne peut voler en régime stabilisé : ce nombre de Mach limite dépend de la nature des matériaux employés. Jusqu'à Mach 2,2 environ il est possible d'utiliser les matériaux légers courants à condition d'employer de l'acier et du titane pour les éléments de structure les plus chauds. C'est la raison du choix de la vitesse maximale de Concorde. Au-delà de ce nombre de Mach les températures rencontrées nécessitent l'abandon de ces matériaux légers.

Ainsi, les pilotes des avions subsoniques doivent respecter une limitation de vitesse (résistance structurale) et une limitation de nombre de Mach (problème aérodynamique). La limite de vitesse est rencontrée, la première, à basse altitude (l'air étant plus dense, les efforts limites sont exercés à des vitesses relativement plus faibles). À haute altitude (en particulier en croisière) c'est la limitation en Mach qui intervient avant la limitation de vitesse. Pour les avions supersoniques, les pilotes doivent respecter une limitation de vitesse (résistance structurale) et une limitation de Mach (température de structure).

Nous n'avons donné ici que les principales raisons de limitations du domaine de vol ; d'autres raisons dues au fonctionnement des entrées d'air, des moteurs et des équipements interviennent également. Nous ne pouvons les étudier dans le cadre nécessairement limité de cet exposé.

2. DÉCOLLAGE ET ATTERRISSAGE

Décrivons rapidement ces deux phases de vol en utilisant les notions acquises jusqu'ici.

2.1. Le décollage. — Une fois l'avion aligné sur la piste, face au vent, le pilote affiche la poussée maximale des moteurs en maintenant l'avion à l'arrêt à l'aide des freins.

Le décollage s'effectue toujours face au vent car il s'agit d'atteindre, après une course au sol minimale, *une vitesse aérodynamique* suffisante pour sustenter l'avion. Vent de face, la vitesse aérodynamique est égale à la vitesse par rapport au sol (qui détermine la longueur de roulement) augmentée de la vitesse du vent.

L'obtention de la poussée maximale, surtout sur les avions à réaction, demande un délai de plusieurs secondes ce qui conduirait à une distance de roulement non négligeable, parfaitement inutile, si le pilote ne maintenait pas l'avion à l'arrêt pendant cette opération. Sur les petits avions à hélice ne possédant pas une roulette de nez, la mise plein gaz sur frein est inutile (le temps de mise plein gaz est rapide) et dangereuse car l'avion risque alors de « passer » sur le nez. Sur les avions de chasse à hélice de la seconde guerre mondiale la mise plein gaz sur frein était impossible pour la même raison que ci-dessus, et parce que, avant d'afficher le plein gaz, le pilote devait attendre que l'avion ait acquis une vitesse suffisante pour rendre les gouvernes efficaces ; l'avion était en effet soumis, de la part du moteur, non seulement à une force de traction mais également à un couple de roulis (tendant à faire tourner l'avion en sens contraire de l'hélice) et à un moment de lacet dû à l'action dissymétrique du souffle de l'hélice sur les dérives. Il fallait donc limiter ces effets parasites tendant à faire sortir l'avion de la piste tant qu'ailerons et gouvernes de direction n'étaient pas utilisables pour équilibrer ces couples parasites.

Une fois les freins libérés, l'avion accélère en roulant sur la piste. Sur les avions tricycles, la hauteur du train avant est choisie de telle sorte que l'incidence au cours du roulement soit l'incidence de traînée minimale. Sur les avions à train dit classique (roulette de queue), le pilote pousse sur le manche de façon à mettre l'avion à l'incidence de traînée minimale dès que l'efficacité de la gouverne de profondeur le permet.

Au cours du roulement la portance de la voilure est pratiquement nulle (le poids de l'avion est équilibré par la réaction du sol sur le train d'atterrissage). La traînée est égale à $\frac{1}{2}\rho\, S\, V^2\, C_{x\min}$ où $C_{x\min}$ est le coefficient de traînée correspondant à l'incidence de portance nulle.

L'accélération en cours de roulement est donc donnée par :

$$m\,\frac{dV}{dt} = F - \frac{1}{2}\rho\, S\, V^2\, C_{x0} - r\left(mg - \frac{1}{2}\rho\, S V^2\, C_{z0}\right)$$

le terme $r\left(mg - \frac{1}{2}\rho\, S\, V^2 C_{z0}\right)$ représentant la force de frottement proportionnelle à la réaction du sol sur l'avion (coefficient de proportionnalité r). Nous avons supposé ici que l'avion était à une incidence α_0 correspondant à un C_{z0} faible mais non nul. La réaction du sol équilibre donc le poids mg de l'avion diminué de la portance $\frac{1}{2}\rho\, S\, V^2\, C_{z0}$.

Lorsque l'avion atteint une vitesse V_R dite vitesse de rotation, à l'aide de la gouverne de profondeur le pilote augmente l'incidence jusqu'à une valeur α_D. La vitesse V_R est choisie de telle sorte que lorsque l'incidence arrive à la valeur α_D, la vitesse a atteint la valeur V_D (l'avion continue à accélérer pendant la rotation) telle que la portance qui en résulte est supérieure au poids. Il s'ensuit une courbure de la trajectoire. La vitesse V_D peut être calculé à l'aide de la relation :

$$m\, V_D\,\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{2}\rho\, C_{zD}\, S\, V^2{}_D - mg \quad \text{(V. formule 19)}$$

où C_z est la valeur de C_z correspondant à α_D.

L'accélération sur trajectoire diminue après V_R puisque C_x augmente. Dès que l'avion décolle (au moment où la portance équilibre le poids) la force de frottement disparaît ; l'accélération après que la vitesse V_D ait été atteinte est donnée par :

$$m\,\frac{dV}{dt} = F - \frac{1}{2}\rho\, C_{xD}\, S\, V^2 - mg\gamma \qquad \text{(V. formule 18)}$$

Dans le cas des avions multimoteurs, l'incidence α_D est choisie de telle sorte qu'en cas de panne d'un moteur, l'avion ne décélère pas.

Dès que l'avion a décollé le pilote rentre le train (pour diminuer la traînée) puis les volets ; les volets ont été mis avant le décollage en position légèrement sortie (position dite de décollage) de façon à accroître la portance à incidence donnée (sans pour autant accroître beaucoup la traînée ce qui serait néfaste du point de vue longueur de décollage). L'utilisation des volets (et des becs) au décollage permet ainsi de diminuer la vitesse V_D et donc de diminuer la longueur de décollage.

Il est nécessaire de rentrer le train et les volets dès que possible de façon à éviter de dépasser la vitesse limite autorisée dans la configuration décollage.

Sur les avions à moteur à pistons, le décollage, après la rentrée du train, est suivi d'une prise de vitesse en palier de façon à atteindre la vitesse optimale de montée (cette vitesse est plus éloignée de la vitesse de décollage sur ce type d'avion que sur les avions à réaction).

2.2. L'atterrissage. — Décrivons l'atterrissage en vol à vue.

Le pilote étant en vue de l'aérodrome à une altitude comprise entre 1 000 et 2 000 pieds (1) demande par radio à la tour de contrôle l'autorisation de pénétrer dans le circuit de piste pour atterrir (« Deauville airport. Ici Foxtrott, Zoulou, Juliette, Roméo Sierra ; autorisation de pénétrer dans votre circuit »).

(1) Nous nous conformons à l'habitude, assez fâcheuse au demeurant, d'utiliser des unités n'appartenant pas au système métrique. Rappelons les correspondances :
1 pied = 0,304 m
1 nœud = 1,852 km/h

Le contrôleur lui transmet alors le numéro de la piste en service (si l'atterrissage se fait au cap 60, le numéro de la piste est 06 ; si l'atterrissage se fait au cap 240, le numéro de la piste est 24 ; ces numéros sont inscrits et bien visibles à chaque extrémité de piste), la pression au sol (ce qui permet au pilote de régler son altimètre de telle sorte que celui-ci lui indique zéro une fois l'avion au sol ; les indications de l'altimètre ainsi réglé, sont alors les altitudes au-dessus de la piste), la « force » et la direction du vent, l'altitude et le sens du tour de piste (en général le tour de piste s'effectue en virant à gauche sauf si des zones sont interdites de survol, ville, installations spéciales, zone de parachutage, etc.). Exemple : « Roméo, Sierra de Deauville airport. Piste en service 06. Pression sol 1 005 millibars, vent au sol du 250 (terme signifiant que le vent vient de la direction correspondant au cap 250), force 10 nœuds. Présentez-vous vent arrière à 1 000 pieds ».

Le pilote se présente alors en palier, en position vent arrière (au droit de la tour, au cap inverse d'atterrissage ; fig. III-15) et annonce sa position à la tour (« Roméo Sierra vent arrière à 1000 pieds »). Le contrôleur donne alors l'autorisation d'atterrir (« Roméo Sierra de Deauville airport, rappeler dernier virage train et volets sortis »).

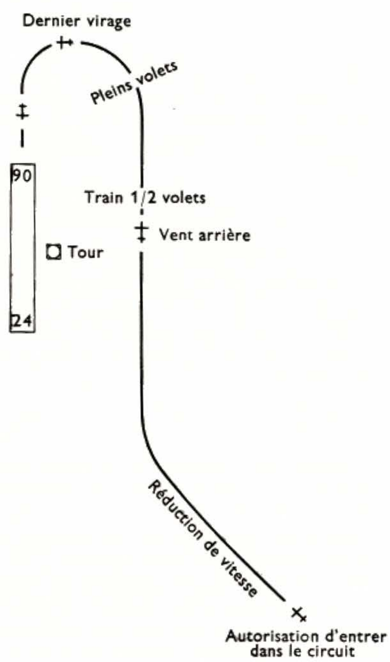


Fig. III-15

Le pilote a déjà réduit la vitesse de façon à voler à la vitesse autorisée pour la sortie du train et des volets ; il sort donc le train et les volets et réajuste la poussée de façon à équilibrer la traînée supplémentaire qui en résulte.

Lorsque l'avion passe par le travers de l'entrée de bande ou un peu après, le pilote entame un virage à gauche en descente pour arriver face à la piste ; au cours de ce virage il réduit sa vitesse tout en se gardant une marge par rapport à la vitesse recommandée d'approche (n'oublions pas que l'avion est en virage), et sort la totalité des volets (plus ou moins tôt suivant la pente nécessaire de descente qui dépend de la position et de l'altitude de début de virage). Lorsque le cap est à 90° du cap d'atterrissage, le pilote vérifie la position du train et des volets et signale sa position à la tour (« Roméo Sierra, dernier virage, train et volets sortis vérifiés »). Le contrôleur confirme alors l'autorisation d'atterrir (« Roméo Sierra, vous êtes numéro 1 pour l'atterrissage, le vent au sol est du 250, force 10 à 15 nœuds »). Le pilote se trouve alors face à la piste à une hauteur voisine de 100 à 300 pieds, la pente nécessaire pour atteindre l'entrée de bande devant être comprise entre 2 et 3° (une pente plus faible nécessite une poussée importante et l'avion se trouve trop près du sol loin de la piste ; une pente trop forte rend délicate la manœuvre d'arrondi). Le pilote juge de sa pente en notant la forme de la piste : seul l'entraînement permet au pilote d'évaluer correctement sa

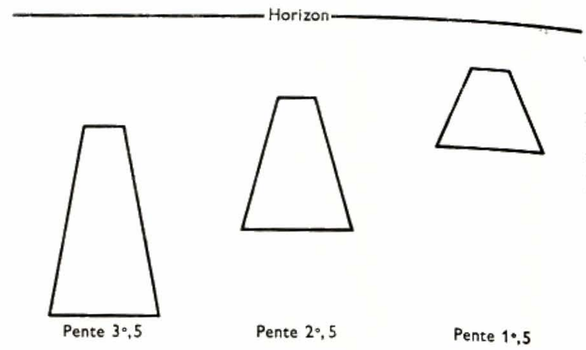


Fig. III-16

pente ; la figure III-16 montre trois aspects de la piste pour un avion trop haut, en bonne position et trop bas.

Sur cet exemple l'avion se trouve à 2 000 m de l'entrée de la bande supposée large de 50 m et longue de 2 400 m.

Après la manœuvre de virage, débutée par le travers de bande et effectuée dans des conditions reproductibles (vitesse, inclinaison, régime moteur), en général l'avion est en bonne position pour l'atterrissage (il reste néanmoins au pilote le soin d'opérer des corrections pour tenir compte du vent).

Si le pilote juge qu'il est trop haut, il augmente la pente en poussant sur le manche et réduit en même temps la poussée pour ne pas prendre de vitesse. S'il se juge trop bas, il augmente la poussée et tire sur le manche pour diminuer la pente (en surveillant son anémomètre pour ne pas laisser décroître la vitesse en tirant trop fort).

Une fois passée l'entrée de piste, le pilote « casse » la trajectoire en augmentant l'incidence : il réduit la pente à une valeur inférieure à un degré ; c'est la phase d'arrondi, la plus délicate de l'atterrissage. Le pilote doit en effet juger de son altitude, deux à trois mètres pour un petit avion de tourisme, une trentaine de mètres pour un Boeing 747 (à l'attitude d'atterrissage roues à terre, le pilote d'un 747 se trouve à 15 m environ du sol) pour commencer sa manœuvre ni trop haut, ni trop bas (sur les avions de transport, l'indicateur du radio-altimètre peut aider le pilote). En outre, il doit diminuer sa pente mais éviter soigneusement de remonter. Dès que la pente a diminué, le pilote réduit les gaz et laisse l'avion décélérer en légère descente jusqu'au moment où les roues touchent le sol.

Il n'est pas recommandé de réduire les gaz avant l'arrondi car l'augmentation d'incidence nécessaire à la manœuvre augmente la traînée ce qui peut conduire à une décélération trop importante en cours de manœuvre (diminution de portance donc courbure de la trajectoire insuffisante, ou dépassement de l'incidence de décrochage en cours de manœuvre).

Sur les petits avions à roulette de queue, le pilote maintient l'avion cabré en décélération à quelques décimètres au-dessus du sol et laisse l'avion décrocher (atterrissage trois points) ; il use ensuite modérément des freins une fois l'avion au sol (un freinage trop intense risque de faire basculer l'avion sur le nez : mise en « pylône »).

En général le freinage est commandé en appuyant sur la partie supérieure des pédales du palonnier : une pression à droite freine la roue droite, une pression à gauche freine la roue gauche. Certains avions légers ne sont pas munis de freins ; une béquille remplace la roulette arrière et freine l'avion en frottant la piste (piste en herbe). Sur les petits avions tricycle, le pilote maintient l'avion roues au sol en position cabrée pour freiner l'avion par la traînée aérodynamique ; lorsque la vitesse est suffisamment réduite il pose la roulette de nez et dose le freinage sur chacune des deux roues pour maintenir l'avion dans l'axe.

Sur les avions de transport, dès l'avion au sol, le pilote actionne les spoïlers qui ont pour double rôle de faire diminuer la portance et d'augmenter la traînée. La force de frottement étant proportionnelle à la réaction du sol sur les roues, on a en effet intérêt à augmenter celle-ci en annulant la portance. Le pilote actionne ensuite la « reverse » ; sur les moteurs à hélice, le pas de l'hélice est inversé et le moteur

mis plein gaz « souffle » vers l'avant ; sur les moteurs à réaction, des obstacles viennent se placer à la sortie du réacteur et dévient le jet vers l'avant. Enfin le pilote actionne les freins et un système automatique règle le freinage de façon à obtenir la décélération maximale sans provoquer de bloquage des roues (une roue bloquée possède un coefficient de frottement beaucoup plus faible qu'une roue non bloquée). Sur ces avions, le contrôle de la direction au roulage se fait à l'aide de la gouverne de direction à grande vitesse, puis en orientant la roulette de nez à moyenne et faible vitesse (la commande de la roulette est en général un petit volant à la disposition du pilote).

2.3. Avions à décollage et atterrissage court — Avions à décollage et atterrissage vertical (A.D.A.C. et A.D.A.V.). — Les avions de transport et les avions militaires demandent actuellement des longueurs de piste comprises entre 2 à 3 km pour décoller et atterrir. Comment réduire cette distance de décollage et d'atterrissage et quelles en sont les conséquences sur les autres performances ?

2.3.1. Décollage et atterrissage court. — Pour diminuer la longueur de décollage il faut réduire la vitesse de décollage V_D et augmenter l'accélération (donc la poussée) de façon à réduire la course nécessaire pour atteindre V_D. L'équation de portance :

$$mg = \frac{1}{2}\rho SV^2_D C_{zD}$$

montre que la diminution de V_D peut être obtenue :

— par augmentation de C_{zD} (augmentation du coefficient C_z disponible à l'incidence de décollage α_D, choisie de façon à respecter une marge raisonnable par rapport au décrochage),

— par diminution de la charge alaire (mg/S).

Une étude soignée de l'hypersustentation : volets à recul (augmentation de surface) avec des fentes permettant d'éviter le décrochage de l'écoulement, un soufflage sur les volets soit par des hélices (solution du Bréguet 941) soit par des réacteurs à taux de dilution élevé (réacteur double flux pour lequel le débit secondaire froid est grand vis-à-vis du débit primaire) permet d'obtenir des valeurs de C_z autorisées importantes. La pente stabilisée disponible à la vitesse V_D est telle que :

$$\begin{cases} mg = \frac{1}{2}\rho SV^2_D C_{zD} \\ mg\gamma = F - \frac{1}{2}\rho SV^2_D C_{xD} \end{cases}$$

soit :

$$\gamma = \frac{F}{mg} - \frac{C_{xD}}{C_{zD}}$$

L'incidence de décollage α_D doit donc être choisie de telle sorte que γ soit maximale, soit C_{xD}/C_{zD} minimal (rappelons que le rapport C_z/C_x est appelé finesse) : α_D est donc l'incidence de finesse maximale en configuration décollage. La figure II-17 montre le point de la polaire pour lequel la finesse est maximale. C'est pour ce point de la polaire que C_{zD} doit être le plus grand possible.

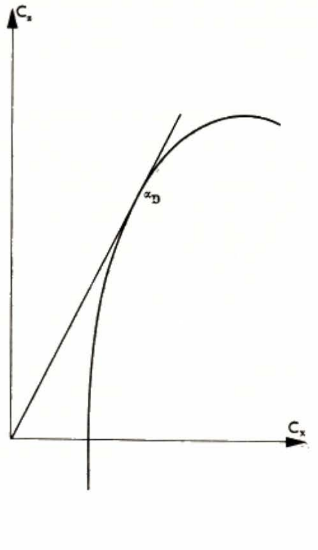


Fig. III-17

$\gamma = \frac{F}{mg} - \frac{C_{xD}}{C_{zD}}$

Pour réduire les distances d'atterrissage il faut obtenir des pentes d'approche importantes (il faut pouvoir atterrir sur des terrains bordés d'obstacles) et des vitesses d'approche aussi faibles que possibles. Ces deux conditions nécessitent de grandes portances et des finesses très faibles (rapport C_x/C_z grand, c'est-à-dire des traînées très importantes en approche). Si la poussée est nulle, la pente d'approche est $\gamma = -\frac{C_x}{C_z}$. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, cette dernière condition n'est pas facile à réaliser surtout dans le cas où une partie de l'hypersustentation est fournie par la déflexion du débit moteur par les volets ; il faut alors une déflexion de plus de 90° pour qu'il n'y ait pas de composante de propulsion parallèle à la vitesse.

Il ne faut pas oublier aussi que la sustentation doit être assurée même en cas de panne de moteur et que les gouvernes doivent rester efficaces alors que les vitesses aérodynamiques sont faibles.

Jusqu'à présent le seul appareil répondant réellement à ces diverses exigences est le Bréguet 941 qui possède une voilure soufflée par quatre hélices. Celles-ci sont solidaires d'un même arbre logé transversalement dans l'aile et entraînées par quatre turbopropulseurs Turmo à turbine libre. Cette solution permet d'avoir un soufflage équiréparti sur la voilure même en cas de panne de l'un des moteurs ; dans ce cas la puissance recueillie par les trois turbines en fonctionnement est répartie sur les quatre hélices par l'intermédiaire de l'arbre transversal.

L'hypersustentation est assurée par des volets à recul et à fentes qui peuvent créer une déflexion de plus de 90°.

Cette solution permet d'assurer des décollages et des atterrissages sur un terrain de 250 m bordé d'obstacles de 15 m de haut.

En revanche, cette solution de soufflage par les hélices ne permet pas de grandes vitesses de croisière : la vitesse maximale obtenue en croisière ne peut dépasser 600 km/h (à ces vitesses les nombres de Mach en extrémité de pale sont voisins de 1, ce qui réduit les performances de l'hélice).

Seule la propulsion par réaction permet d'assurer de grandes vitesses de croisière mais le problème de l'hypersustentation par soufflage reste difficile à résoudre (cas de la panne de moteur).

2.3.2. Décollage et atterrissage vertical. — Pour assurer le décollage et l'atterrissage vertical il faut disposer d'une force de portance, fournie non par la voilure mais par un moteur, et au moins égale au poids. De façon à assurer une bonne possibilité de manœuvre dans le plan vertical il faut que la poussée disponible soit voisine de 1,2 à 1,3 fois le poids de l'avion. De nombreuses solutions sont possibles mais chacune résoud plus ou moins bien les exigences contradictoires du décollage vertical et des performances correctes en croisière (vitesse et rayon d'action). La sustentation et la propulsion peuvent être assurées par des moteurs distincts ou par le même moteur dont on défléchit la poussée (basculement du moteur en entier ou déflexion du jet).

La poussée de sustentation peut être obtenue au moyen de réacteurs simple flux (faible débit, grandes vitesses d'éjection), de réacteurs double flux plus ou moins dilués (débit plus grand, vitesses d'éjection diminuées), ou d'hélices carénées ou non (très grands débits, faible vitesse d'éjection), pouvant atteindre de très grandes dimensions (hélicoptère). Dans ce dernier cas le rotor assure à la fois la sustentation dans tout le domaine de vol et la propulsion (V. chap. 1).

La solution des réacteurs de sustentation a pour elle son faible encombrement (gain de masse et de volume de fuselage c'est-à-dire gain de traînée) ; elle a contre elle la forte consommation spécifique des réacteurs.

La solution des hélices sustentatrices a pour elle la faible consommation et contre elle l'encombrement.

Si l'on cherche à faire un appareil destiné à effectuer du vol stationnaire prolongé, le choix se portera donc vers la solution hélicoptère avec un glissement vers les hélices carénées si l'on tient à avoir des vitesses de croisière comprises entre 300 à 400 km/h.

En revanche, si l'on cherche à faire un avion à grande vitesse de croisière et à long rayon d'action et ne volant en stationnaire que pour le décollage et l'atterrissage, la solution réacteur de sustentation peut être avantageuse. Dans ce cas, on peut se poser la question du choix entre les solutions propulsion et sustentation séparées ou propulsion et sustentation assurées par le même moteur.

La propulsion d'un avion à Mach 0,9 nécessite des réacteurs ayant une poussée totale représentant 20 % du poids de décollage. Pour un avion volant à Mach 2, la poussée disponible au point fixe doit représenter sensiblement 40 % du poids de décollage. Or, nous savons que le décollage vertical nécessite une poussée voisine de 120 à 130 % du poids. Les réacteurs de sustentation doivent donc être utilisés au tiers de leur poussée maximale pour assurer la propulsion à Mach 2 (nous ne tenons pas compte des pertes dues à la déflexion du jet qui nécessitent des poussées installées plus fortes.) Or, dans ces conditions les consommations spécifiques des réacteurs sont très grandes.

Ainsi, la solution « propulsion-sustentation » combinée a pour avantage un gain de poids dû à l'absence des réacteurs de sustentation. Cependant ce gain entraîne une augmentation de consommation et un surdimensionnement du réacteur pour la croisière. Le choix de la solution est alors loin d'être évident, et seules des étude précises peuvent permettre de faire un choix dans chaque cas particulier. De cette courte étude des avions A.D.A.C. et A.D.A.V., nous retiendrons que rechercher des pistes courtes (ou ponctuelles) coûte cher en performance de croisière et que seules des conditions économiques (pour les avions civils) ou opérationnelles (pour les avions militaires) particulièrement impératives peuvent justifier une réduction des longueurs de piste. Notons aussi que nous n'avons pas évoqué le problème du bruit, problème qui se révèle particulièrement critique dans le cas du décollage et de l'atterrissage court (forte poussée) sur des aéroports au voisinage des villes.

3. LA MÉCANIQUE DU VOL DES FUSÉES-SONDES

Les fusées-sondes constituent une famille de véhicules aérospatiaux destinés à amener à haute altitude une certaine charge utile. Généralement non pilotées, elles accomplissent une mission qui comporte le plus souvent trois phases: la montée propulsée, la phase balistique et la rentrée dans l'atmosphère (fig. III-18).

Pendant la montée propulsée, qui s'effectue à forte pente, la fusée est accélérée par un ou plusieurs étages propulsifs, largués tour à tour après combustion. Cette phase du vol détermine la performance du véhicule. Pour la précision de la trajectoire les premiers instants sont les plus critiques en raison de la faible vitesse de la fusée en sortie de rampe.

La phase balistique prolonge la montée propulsée; dans sa partie ascendante, elle est caractérisée par une décroissance régulière de la vitesse sous l'action conjuguée de la pesanteur et de la résistance aérodynamique. Comme la montée propulsée, elle peut s'accompagner de phénomènes dynamiques plus ou moins perturbateurs, en relation avec la stabilité. Le parcours de l'arc balistique supérieur a souvent lieu dans une atmosphère raréfiée dont l'action est négligeable sur la fusée; le mouvement du véhicule dépend alors uniquement des conditions en fin de traversée de l'atmosphère. Pour certaines fusées, ce parcours peut constituer l'essentiel du vol.

La rentrée dans l'atmosphère marque la fin de la mission; elle se traduit par un important freinage aérodynamique naturel et s'accompagne de mouvements angulaires de grande amplitude. Elle s'achève parfois par une séquence de récupération de la charge utile, impliquant la mise en œuvre de dispositifs appropriés, comme les parachutes.

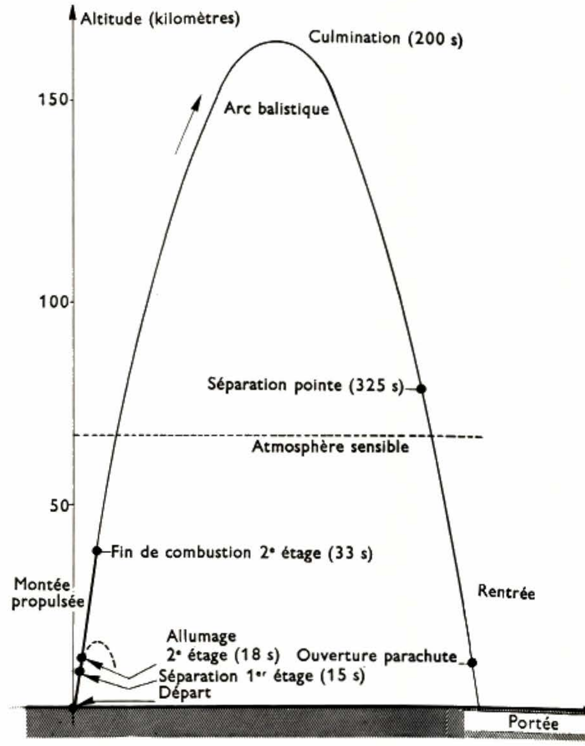


Fig. III-18 — Plan de vol type d'une fusée-sonde

En plus de ces trois phases classiques, certains plans de vol comportent une descente propulsée, requise par la mission expérimentale de la fusée (rentrée à grande vitesse). Cette phase supplémentaire peut nécessiter, si elle débute dans le vide, le prépointage de la fusée par un pilote automatique.

L'étude de ces différentes phases, en ce qui concerne la mécanique du vol, comprend deux sortes d'analyses: une analyse de performance et une analyse de perturbations. La première vise à déterminer la *trajectoire nominale* de la fusée; le véhicule est généralement considéré comme un point matériel soumis aux seules forces significatives. La deuxième vise à évaluer la *stabilité* de la fusée et la *dispersion* de sa trajectoire sous l'effet de diverses perturbations; le mouvement angulaire y est pris en considération ainsi que l'ensemble des forces et moments appliqués.

Ces analyses sont couramment effectuées sur ordinateur, en utilisant une représentation mathématique complète de la dynamique de la fusée, incluant souvent les six degrés de liberté du mouvement et tenant compte des données expérimentales acquises en cours d'étude. Cependant, en schématisant suffisamment les problèmes, par quelques analyses simples il est possible de dégager les tendances qui influent sur la conception d'une fusée-sonde et sur son utilisation.

3.1. Étude de la trajectoire nominale. — La trajectoire d'une fusée est usuellement repérée dans le trièdre géographique local $OXYZ$, dont l'origine O est située au point de lancement, X étant orienté vers l'Est, Y vers le Nord, et Z vers le zénith. Cependant, pour les analyses les plus simples, si l'on admet:

- que l'axe longitudinal de la fusée reste confondu avec la direction du vecteur vitesse,
- que l'air est immobile,
- que la rotation de la terre est négligeable,

la trajectoire reste contenue dans un plan vertical, appelé *plan de tir;* les variables du mouvement se limitent à la distance X' parcourue horizontalement, à l'altitude Z, à la vitesse V et à la pente γ.

3.1.1. Forces appliquées à la fusée-sonde. — Dans l'étude de la trajectoire nominale les seules forces que l'on

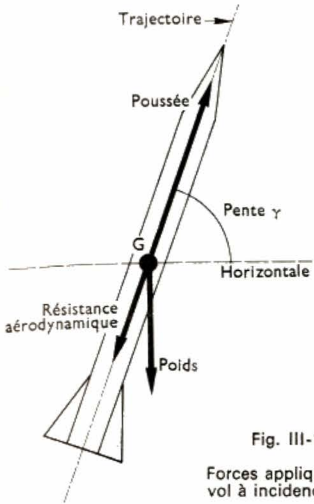


Fig. III-19

Forces appliquées en vol à incidence nulle

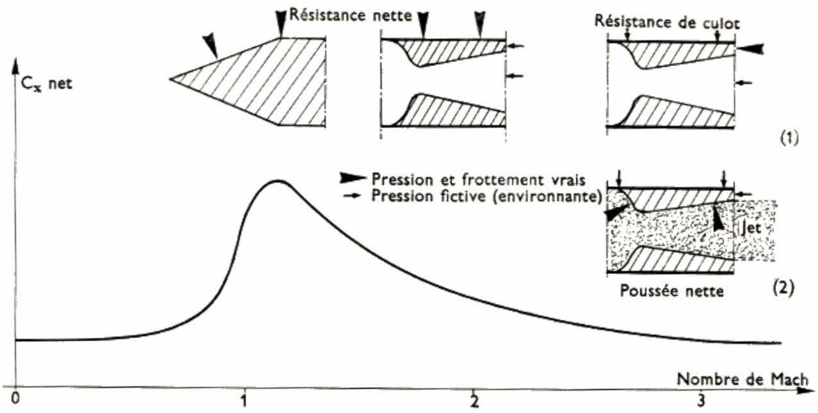


Fig. III-20 — Coefficient de résistance aérodynamique nette. Cette définition de la résistance est assortie d'une définition correspondante de la résistance de culot (1) et de la poussée nette (2)

suppose appliquées à la fusée sont la pesanteur, la résistance aérodynamique et la poussée (fig. III-19).

Pour des analyses locales de trajectoire, le *champ de pesanteur* peut être assimilé à un champ uniforme; mais si la tranche d'altitude considérée atteint quelques dizaines de kilomètres, il doit être corrigé de l'effet d'altitude selon la formule approchée :

$$g = g_0 \left(1 - 2\frac{Z}{R}\right)$$

si l'on appelle :

g l'accélération de la pesanteur à l'altitude Z,

g_0 l'accélération de la pesanteur à une altitude nulle,

R le rayon moyen de la Terre.

Pour une altitude de 500 km, par exemple, l'emploi de la formule approchée introduit une correction de 2 % sur la valeur de l'attraction terrestre. Pour les arcs balistiques importants, il est nécessaire d'utiliser une représentation encore plus exacte (champ central).

La résistance aérodynamique X^A dépend de l'altitude et de la vitesse ; elle s'exprime par la formule :

$$X^A = C_x S \frac{\rho}{2} V^2$$

où C_x est un coefficient sans dimension caractéristique de la configuration de la fusée, S une surface de référence, généralement le maître-couple, ρ la masse volumique de l'air ambiant et V la vitesse. Le coefficient C_x, pratiquement indépendant de la vitesse en régime subsonique, marque une augmentation brusque en régime transsonique, puis décroît ensuite régulièrement quand le nombre de Mach augmente; ce coefficient C_x est également lié de façon complexe à la viscosité de l'air mais cet effet reste d'importance secondaire.

La masse volumique de l'air varie largement avec l'altitude; elle subit en outre des variations systématiques et aléatoires. Cependant, pour les études de projet, on utilise couramment *l'atmosphère standard*, parfois schématisée, dans une tranche d'altitude de 0 à 40 km par la formule approchée :

$$\rho = \rho_0 \, \mathbf{e}^{-\beta Z}$$

($\rho_0 = 1{,}225$ kg/m³ ; $\beta = 7\,700$ m^{-1} ; $\mathbf{e} = 2{,}718$).

Il importe de noter que, conventionnellement, la résistance aérodynamique utilisée dans les calculs est une résistance *nette;* par ce terme on admet que, fictivement, la pression ambiante règne au culot normalement occupé par le jet de la fusée; cette convention est assortie d'une convention analogue pour la définition de la poussée (fig. III-20).

Sur une fusée-sonde, *la poussée* $\vec{F}$ est fournie par un propulseur à poudre ou à liquide; son intensité F reste constante pendant la combustion d'un même étage et *l'impulsion* délivrée par cet étage, c'est-à-dire le produit $F\Delta t$ (Δt étant le temps de combustion), est proportionnelle à la masse de propergol ; la poussée s'exprime par la formule :

$$F = \frac{dm}{dt} V_j + (p_s - p_0)\, S_s$$

où $\frac{dm}{dt}$ représente le débit massique de propergol, V_j la vitesse de sortie du jet, p_s la pression dans le jet à la sortie, p_0 la pression ambiante et S_s la section de sortie du jet. Le terme $(-p_0 S_s)$ résulte de la définition conventionnelle de la *poussée nette*, pour laquelle on admet fictivement que la pression ambiante règne partout ailleurs que dans le jet; les deux autres termes représentent la poussée dans le vide F_v, indépendante des conditions extérieures et exprimée usuellement par la formule :

$$F_v = g\, I_{sp} \frac{dm}{dt}$$

g étant l'accélération de la pesanteur et I_{sp} *l'impulsion spécifique*. Cette dernière est caractéristique du propergol utilisé et vaut 250 à 300 s, pour les fusées courantes. Sans doute la poussée dans le vide dépend-elle aussi de la configuration de la tuyère et croît-elle avec la section de sortie du jet mais, en fait, il n'est pas avantageux d'aller au-delà des compromis actuels pour diverses raisons (décollement interne du jet, augmentation du maître-couple de la fusée, augmentation de masse) et la valeur de I_{sp} reste attachée à un type de propergol.

3.1.2. Performances. — La performance d'une fusée-sonde est essentiellement caractérisée par son altitude de culmination ; les autres paramètres significatifs de la mission (temps de vol, vitesse maximale à la rentrée, etc.) lui sont pour la plupart directement liés. Les uns et les autres découlent d'ailleurs du déroulement de la montée propulsée.

1° *Montée propulsée et phase balistique ascendante.* En première approximation, si l'on admet que la poussée est prépondérante devant la pesanteur et la résistance aérodynamique, l'accroissement de vitesse communiqué à la fusée par un étage propulsif s'exprime par la formule :

$$V_2 - V_1 = g\, I_{sp} \ln \frac{m_1}{m_2}$$

où les indices 1 et 2 se rapportent respectivement au début et à la fin de la combustion ; la poussée ne figure pas dans cette formule mais le *rapport des masses* (m_1/m_2) joue un rôle déterminant. Cela explique la sensibilité de la performance à la masse de la charge utile, malgré sa petitesse en valeur absolue (fig. III-21). Il résulte indirectement de cette formule qu'il y a avantage à découper une masse déterminée de propergol en plusieurs étages propulsifs, à condition toutefois que *l'indice de construction* de chacun, c'est-à-dire le rapport de la masse à vide à la masse à plein de l'étage, ne se dégrade pas trop quand on réduit la taille des étages; cette dégradation existe cependant et il s'y ajoute de nombreuses autres sujétions technologiques qui limitent à deux ou trois le nombre d'étages affectés à la montée.

En deuxième approximation, l'impulsion de la pesanteur s'oppose à l'impulsion de la poussée ; elle est d'autant plus grande que la durée de propulsion est plus longue. Aussi,

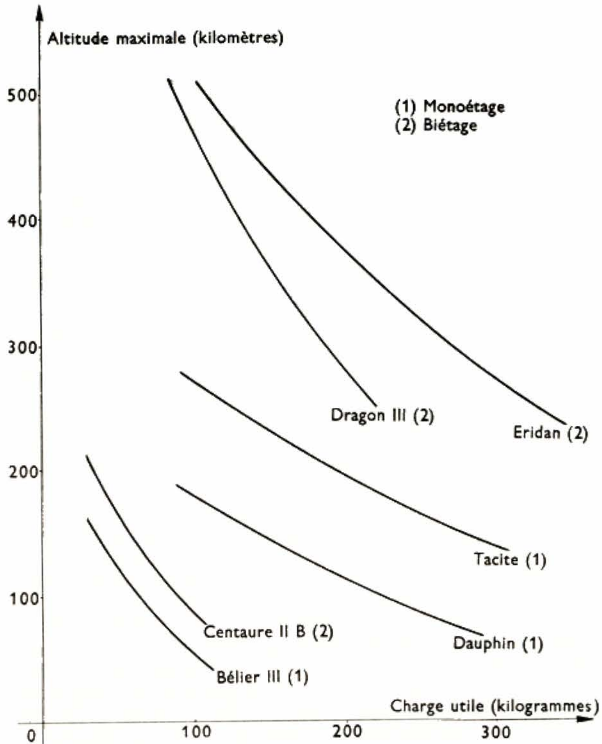


Fig. III-21 — Influence de la charge utile sur l'altitude maximale

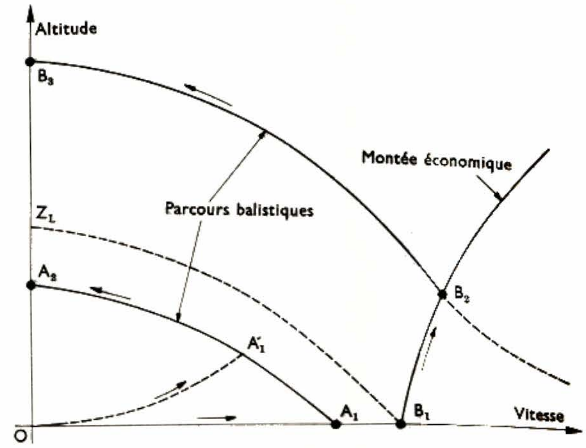


Fig. III-22 — Montée optimale. Pour atteindre une altitude inférieure à Z_L, la montée optimale devrait comprendre un accroissement instantané de vitesse OA_1 suivi d'un parcours balistique A_1A_2 ; la consommation en propergol est un peu plus grande pour le parcours réaliste OA'_1A_2. Pour atteindre une altitude supérieure à Z_L, la montée optimale est constituée par l'accroissement de vitesse OB_1, la montée économique B_1B_2 et le parcours balistique B_2B_3

lorsque la résistance aérodynamique est faible devant le poids, y a-t-il avantage à équiper une fusée d'étages propulsifs à forte poussée et à temps de combustion court; cela a comme autre résultat heureux de diminuer le diamètre des propulseurs et, par conséquent, la résistance aérodynamique.

La situation est différente quand la résistance aérodynamique cesse d'être faible devant le poids. On établit alors qu'il y aurait avantage, pour minimiser la consommation de propergol à altitude de culmination déterminée, à suivre, avec une poussée variable, une loi de montée *économique* donnée par la relation :

$$mg = V\frac{\partial X^A}{\partial V} - X^A$$

Dans le cas particulier où C_x est constant cette loi signifie qu'il faut monter avec une vitesse telle que la résistance aérodynamique soit égale au poids. La montée optimale se décomposerait ainsi en un accroissement instantané de vitesse destiné à rejoindre la montée économique, un parcours suivant la loi économique et une montée balistique jusqu'à la culmination (fig. III-22). Ce profil de mission, pratiquement irréalisable en totalité est néanmoins grossièrement suivi par les fusées à deux étages dont le premier est un accélérateur à temps de combustion court (*booster*), et le deuxième un propulseur à temps de combustion long de poussée plus faible.

2° *Séparations d'étages.* — Les séparations d'étages introduisent dans la montée propulsée des temps morts préjudiciables à la performance ; c'est pourquoi elles sont organisées de façon à s'accomplir sans délai. Réalisées par le jeu des forces d'inertie et aérodynamiques appliquées à l'étage brûlé et au reste de la fusée, elles sont déclenchées soit par un accéléromètre, soit par un manomètre branché sur le propulseur, l'un ou l'autre décelant la « queue de poussée » de l'étage consommé et désolidarisant l'assemblage avec un certain retard (fig. III-23).

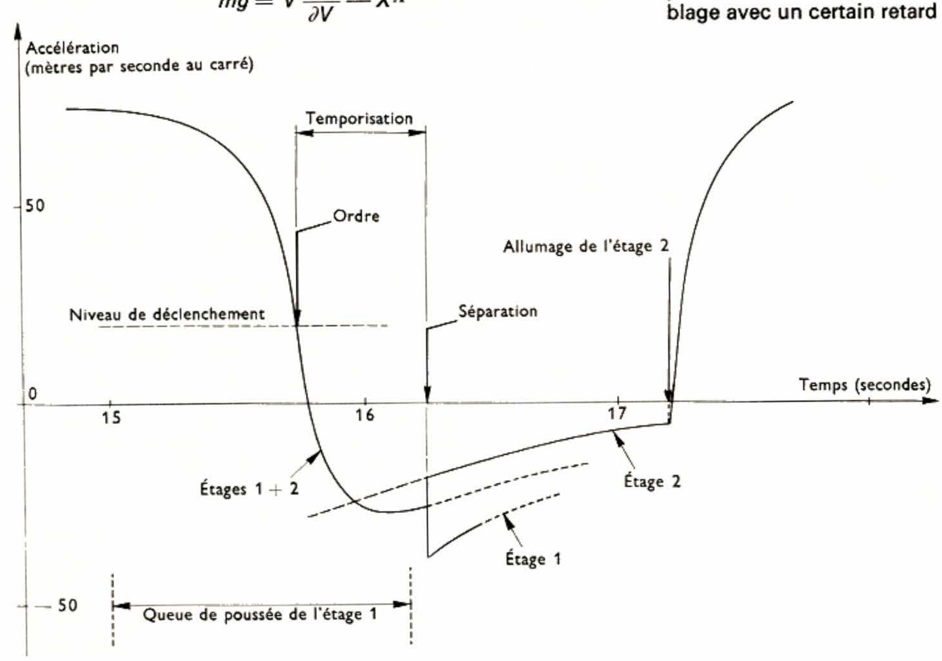


Fig. III-23

Séparation d'un étage propulsif La séparation est commandée par accéléro-contact de telle sorte qu'elle s'accomplisse quand le freinage de l'étage brûlé est supérieur à celui de la fusée elle-même

3° *Phase balistique dans le vide.* — Dans le vide, la fusée non propulsée parcourt un arc d'orbite képlérienne, (dont le centre de la Terre est un foyer), par les conditions en sortie d'atmosphère et les variations des paramètres de trajectoires sont données, en toute rigueur, par les lois de la mécanique céleste. Cependant, l'hypothèse du champ de pesanteur uniforme conduit à un certain nombre de résultats simples mais approchés :

a) la vitesse horizontale V_H reste constante,

b) la durée de parcours de l'arc balistique est proportionnelle à la vitesse verticale initiale V_{Z_0} :

$$t = 2\,\frac{V_{Z_0}}{g}$$

c) l'altitude de culmination varie comme le carré de la vitesse verticale initiale :

$$Z_{\max} = Z_0 + \frac{V_{Z_0}^2}{2\,g}$$

d) la portée X' de l'arc balistique est liée aux composantes de la vitesse initiale par la formule :

$$X' = 2\,V_H \cdot \frac{V_{Z_0}}{g}$$

Si le tir est presque vertical, l'altitude de culmination est peu sensible à la pente initiale γ_0 ; en revanche la portée est proportionnelle à l'écart $(\frac{\pi}{2} - \gamma_0)$ entre la direction de sortie de l'atmosphère et la verticale.

4° *Rentrée dans l'atmosphère.* — Quand une fusée-sonde de grande performance (ou sa pointe récupérable) rentre dans l'atmosphère, elle rencontre d'abord une résistance aérodynamique croissante qui est rapidement très supérieure à la pesanteur et qui freine le véhicule. La réduction de vitesse entraînant une diminution de la résistance,

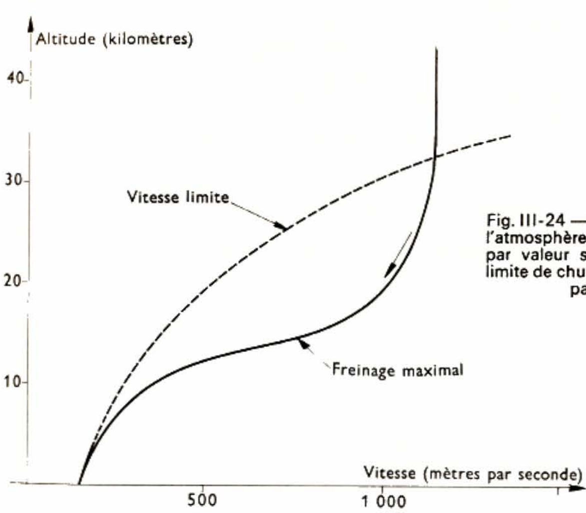


Fig. III-24 — Freinage à la rentrée dans l'atmosphère. La vitesse de rentrée tend par valeur supérieure vers la vitesse limite de chute libre et le freinage passe par un maximum

celle-ci passe par un maximum et décroît ensuite jusqu'à l'égalité avec le poids de la fusée. À partir de ce moment, la fusée tombe à sa vitesse limite (vitesse d'un corps tombant en chute libre dans l'air) d'autant plus faible que l'altitude est plus basse (fig. III-24). Il convient de remarquer que, la décélération maximale ne dépend que de la vitesse de rentrée et non du véhicule ; au contraire, l'altitude de décélération maximale ne dépend que du véhicule et non de la vitesse de rentrée.

3.1.3. Forme de la trajectoire nominale. — Pendant la montée propulsée, la composante de pesanteur normale à la trajectoire tend à incurver celle-ci et à l'écarter de plus en plus de la verticale ; si la montée s'effectue avec une accélération constante Γ, l'angle $\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)$ de la trajectoire avec la verticale augmente suivant la loi :

$$\frac{\pi}{2} - \gamma = \left(\frac{\pi}{2} - \gamma_1\right)\left(\frac{t}{t_1}\right)^{g/\Gamma}$$

l'indice 1 étant relatif à un instant de référence, compté à partir de la mise à feu. Ainsi, toute modification de la pente γ à un instant quelconque du vol, due par exemple à une perturbation au départ ou à une rafale de vent en cours de montée, s'amplifie et se répercute proportionnellement sur la pente γ_f en fin de montée et, par suite, sur la portée. La singularité de l'instant initial, pour lequel toutes les trajectoires devraient être verticales d'après la formule, provient de l'hypothèse, erronée à cet instant, que la fusée reste toujours alignée sur le vecteur vitesse.

La rotation terrestre a une influence perceptible sur les phases balistiques de longue durée ; elle gauchit notamment la trajectoire et provoque un déport d'impact à deux composantes : une composante vers l'Ouest valant $\frac{1}{6}\,g\omega t^3 \cos\varphi$ et une composante normale au plan de tir valant $V_H\,\omega t^2 \sin\varphi$, expressions où ω est la vitesse de rotation terrestre, φ la latitude et t le temps de vol.

3.2. Stabilité et déviation de trajectoire. — Les fusées-sondes sont généralement stabilisées aérodynamiquement au moyen d'empennages disposés à l'arrière du véhicule. Par stabilité aérodynamique, on désigne la tendance naturelle de la fusée à aligner son axe longitudinal sur le vecteur-vitesse. Cependant, cet alignement n'est ni instantané, ni rigoureux, surtout au moment du lancement ; cela est la cause de multiples phénomènes qui concernent aussi bien le mouvement angulaire de la fusée que la déviation de sa trajectoire, phénomènes parfois nettement affectés par la rotation axiale plus ou moins rapide (quelques tours par seconde) dont on anime volontairement la fusée pour réduire sa dispersion.

En général, les problèmes de stabilité et de dispersion s'étudient dans un trièdre $Gxyz$ lié à la fusée dont l'origine est au centre de gravité, Gx étant l'axe longitudinal, dit de *roulis*, Gy et Gz étant des axes transversaux choisis conventionnellement, dits respectivement, de *tangage* et de *lacet* ; pour éliminer la rotation axiale de la représentation du mouvement, on utilise aussi un trièdre semi-lié $Gx\bar{y}\bar{z}$, dit aérobalistique, dont l'axe Gx est l'axe de la fusée mais dont la vitesse de roulis est nulle, par définition. Le repère absolu du mouvement est un trièdre $Ox_0y_0z_0$, dont l'axe Ox_0 est la direction de lancement, le plan Oz_0x_0 étant vertical (fig. III-25).

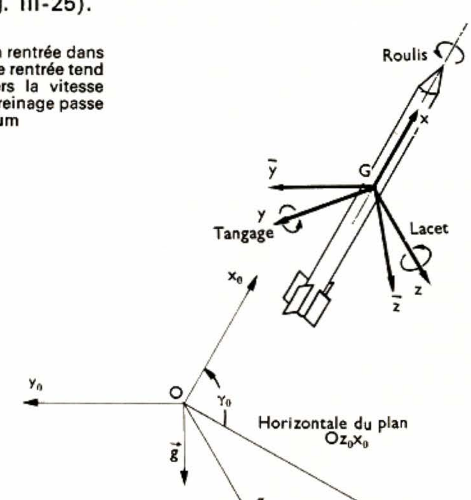


Fig. III-25 — Repères du mouvement et conventions

3.2.1. Action aérodynamique sur la fusée. — Quand l'axe Gx de la fusée n'est pas confondu avec le vecteur vitesse $\vec{V}$ et fait avec lui un certain angle *d'incidence* α, la force aérodynamique résultante se décompose en une *résistance* X^A, portée par la direction de $\vec{V}$, et une *portance* Z^A, normale à $\vec{V}$, située dans le plan $(Gx, \vec{V})$, et proportionnelle à α ; en outre, il apparaît en G un moment aérodynamique M^A, également proportionnel à α, autour d'un axe perpendiculaire au plan d'incidence et tendant à

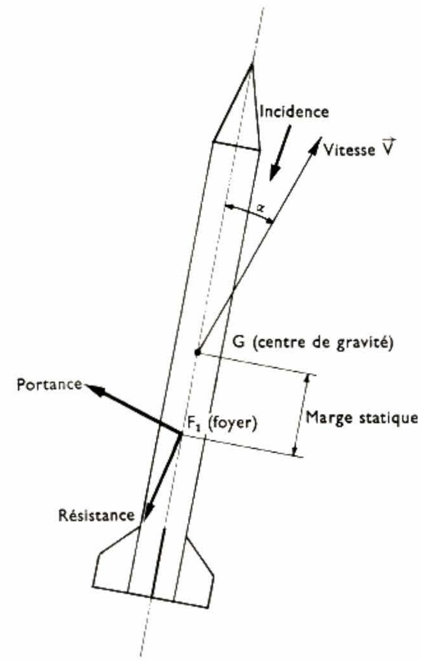


Fig. III-26

Forces aérodynamiques en vol à incidence non nulle

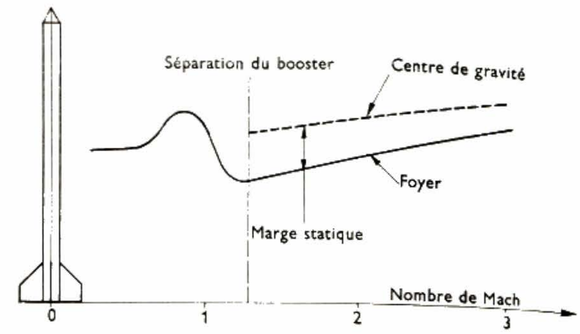


Fig. III-27 — Variations de la marge statique. La marge statique peut varier au cours d'un vol car la position du foyer dépend du nombre de Mach et celle du centre de gravité dépend de la masse de propergol

ramener l'incidence vers zéro. Comme la résistance, la portance et le moment sont proportionnels à la pression cinétique $\frac{\rho V^2}{2}$. Le rapport $\frac{M^A}{Z^A}$ définit le point d'application F_1 de la force aérodynamique, appelé *foyer* (fig. III-26). La fusée est stable aérodynamiquement si le foyer est en arrière du centre de gravité; la distance GF_1 est la *marge statique*. Cette marge peu varier au cours de la combustion d'un étage car le foyer avance quand le nombre de Mach augmente (régime supersonique); le centre de gravité avance également par suite de la consommation de propergol. En général, on donne aux empennages des dimensions telles que la marge statique ne soit jamais inférieure à un demi-diamètre de fusée (fig. III-27).

En plus de ces effets prépondérants, l'incidence induit également:

— un moment transversal (autour de l'axe transversal contenu dans le plan d'incidence) dû à l'action conjuguée du roulis et de l'incidence (effet *Magnus*),

— un moment transversal dû au biais de l'incidence, quand le plan d'incidence n'est pas un plan de symétrie des empennages,

— un moment axial quand l'incidence est biaise.

Par ailleurs, la rotation de la fusée induit des moments d'amortissement de roulis, de tangage et de lacet autour de chacun des axes concernés. Il est à noter que le jet propulsif induit également, par effet interne, un moment d'amortissement transversal non négligeable mais d'importance moindre.

3.2.2. Mouvement en sortie de rampe. — Le mouvement en sortie de rampe s'effectue dans des conditions rapidement variables qui lui confèrent un caractère éminemment transitoire. C'est pendant ce mouvement que se décide la trajectoire du véhicule. La relation entre le site de la rampe et la portée en dépend; la précision du tir également. En effet, 90 % de l'écart-type de la dispersion transversale du point d'impact résultent des perturbations initiales du vol et du vent dans les basses couches.

1° *Propriétés du mouvement.* — Qualitativement, la sortie de rampe peut être décrite de la façon suivante (fig. III-28):

a) Les conditions initiales engagent la fusée dans une évolution qui, d'abord, diffère peu d'une évolution dans le vide; c'est pendant ces premiers instants que la trajectoire s'infléchit le plus, sous les effets conjugués de la poussée du propulseur, non alignée avec le vecteur vitesse, et de la composante transversale de pesanteur.

b) La vitesse augmentant, un moment aérodynamique stabilisateur apparaît et ramène la direction de la poussée vers le vecteur vitesse; la déviation de trajectoire cesse alors de croître.

c) La vitesse angulaire acquise par le véhicule au cours du retour vers l'incidence nulle engage la fusée dans une oscillation d'incidence régie par le système de forces en présence; la trajectoire ondule corrélativement mais sa direction se stabilise.

On démontre en outre que chaque oscillation s'accomplit sur une distance fixe appelée *longueur d'onde*, d'autant plus courte que la fusée est plus stable (200 m environ pour la fusée Bélier).

Le phénomène de sortie de rampe couvre environ une longueur d'onde; après quoi la direction de la trajectoire évolue comme si la fusée volait à incidence toujours nulle.

2° *Sortie nominale de rampe.* — Même en l'absence de toute perturbation, la sortie de rampe s'accompagne d'une certaine oscillation tout à fait prévisible.

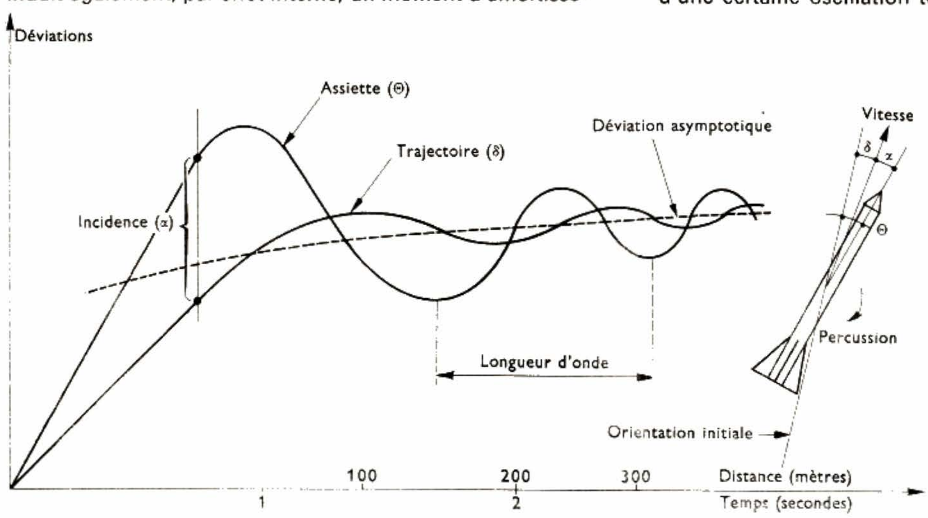


Fig. III-28

Oscillation consécutive à une percussion angulaire en sortie de rampe

Guidée mécaniquement par des glissières sur une longueur variable, selon la rampe et le véhicule (quelques mètres au plus), la fusée peut subir un basculement systématique provoqué par l'échappement non simultané de ses patins avant et arrière ; ce basculement est souvent éliminé par la libération simultanée des liaisons. Mais, même dans ce cas, la poussée et la pesanteur n'étant pas colinéaires, au début la trajectoire prend une direction différente de l'axe de la fusée ; l'incidence n'est donc pas nulle et une petite oscillation s'engage dans un plan vertical, à l'issue de laquelle la direction de la trajectoire se détermine.

C'est ce mouvement qui régit la relation entre le site θ_0 de la rampe et la pente γ_1 de la trajectoire non perturbée, à un instant de référence t_1, postérieur à la mise à feu ; la sensibilité $\frac{\Delta\gamma_1}{\Delta\theta_0}$ est un élément important du calcul des corrections de tir.

3° *Perturbations en sortie de rampe.* — En réalité, une fusée est toujours perturbée par différentes actions d'importance inégale, dont les deux plus graves sont le défaut d'alignement du jet propulsif et le vent. Les autres perturbations, comme les défauts de calage des empennages et les percussions angulaires, ont des effets moindres sur les fusées bien construites, pour lesquelles les tolérances d'alignement sont de quelques minutes d'angle.

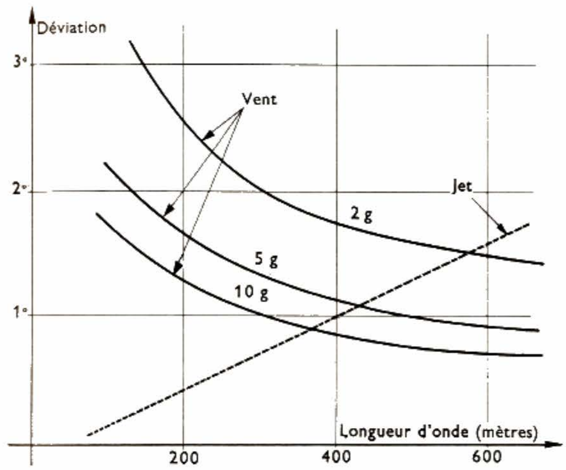


Fig. III-29 — Déviations asymptotiques de trajectoire sous l'influence du vent et d'un défaut d'alignement du jet (g : accélération de la pesanteur)

Sur une fusée non tournante, le défaut d'alignement du jet (excentrement ou décalage angulaire) amorce un basculement de la fusée dès la sortie de rampe. La déviation résultante ne dépend pas de l'accélération mais elle est d'autant plus grande que la stabilité aérodynamique est plus faible (fig. III-29). Pour réduire cette déviation il y a avantage à utiliser une rampe longue afin de rencontrer à la sortie une stabilité aérodynamique suffisante (fig. III-30). Il existe aussi un autre moyen, adopté parfois : grâce à une paire d'impulseurs on communique à la fusée une vitesse de roulis, aussitôt que possible après la sortie de rampe. L'effet du moment perturbateur M devient alors analogue à celui d'une percussion angulaire d'autant plus faible que l'accélération de roulis $\frac{dp}{dt}$ est plus grande. Cette percussion est donnée par la formule suivante :

$$q = \frac{M}{I} : \left(\sqrt{\frac{2}{\pi}\frac{dp}{dt}}\right)$$

où I est le moment d'inertie transversal de la fusée. On parvient ainsi, compte tenu des diverses contraintes, à diviser la déviation par un facteur 3 ou 4.

Le roulis, également efficace contre les défauts de calage des empennages, est cependant sans effet contre le vent. Celui-ci fait basculer progressivement la fusée dans un sens qui tend à annuler l'incidence aérodynamique, en sorte que le véhicule *remonte* le vent. La déviation résultant de cette action est d'autant plus grande que l'accélération est plus faible et que la fusée est plus stable (V. fig. III-29).

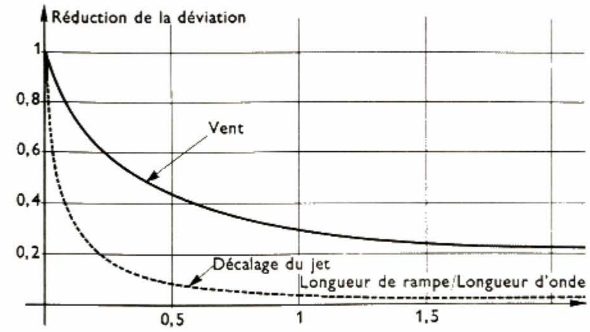


Fig. III-30 — Influence du guidage mécanique sur la déviation. La longueur de guidage sur rampe doit être importante pour atténuer sensiblement la déviation de trajectoire due au vent et celle due au défaut d'alignement du jet

La longueur de rampe joue dans un sens favorable mais elle devrait atteindre plusieurs dizaines de mètres pour que l'atténuation soit sensible (V. fig. III-30). Aussi s'attache-t-on à compenser l'effet du vent par une correction de l'orientation de rampe, calculée avant le tir en tenant compte de la vitesse du vent mesurée ; l'écart entre le vent réel et le vent présumé reste néanmoins voisin de 1 à 2 m/s, par suite de variations et d'erreurs diverses, ce qui donne à cette perturbation la prépondérance dans la déviation globale.

3.2.3. Mouvement pendant la traversée de l'atmosphère. — Tant qu'une fusée-sonde n'est pas gravement perturbée, ses petits mouvements se décomposent en un mode lentement divergent et en une oscillation d'incidence. Le mode lentement divergent n'est qu'un aspect particulier du phénomène normal de courbure progressive de la trajectoire nominale : en effet, si la fusée est initialement légèrement écartée de sa trajectoire normale, elle suivra une trajectoire voisine, régie par la même loi, et l'écart ira croissant. En revanche, l'oscillation d'incidence met en jeu les divers phénomènes aérodynamiques en relation avec le mouvement angulaire de petite amplitude.

De plus, le mouvement de la fusée peut prendre un caractère tout différent, par suite de l'intervention des phénomènes aérodynamiques liés aux grandes incidences ; ceux-ci peuvent parfois conduire à une divergence indésirable des paramètres d'attitude.

1° *Oscillation d'incidence.* — L'oscillation d'incidence d'une fusée présente une certaine parenté avec celle d'un avion : comme celle-ci, elle est régie principalement par le moment de rappel proportionnel à l'incidence (dérivée $C_{m\alpha}$) et son amortissement lui est communiqué directement par le moment d'amortissement de tangage (dérivée C_{mq}) et, indirectement, par l'ondulation concomitante de la trajectoire, résultant de la portance (dérivée $C_{z\alpha}$). Cependant, elle possède un caractère propre dû à la symétrie du véhicule qui confère le même rôle aux plans Gxy et Gzx et permet de réunir les deux composantes de l'incidence en une seule incidence *complexe*.

En outre, la diminution régulière de la masse volumique de l'air pendant la montée, ainsi que les effets gyroscopique et Magnus introduisent certaines particularités. L'analyse mathématique établit que l'incidence complexe α est régie par l'équation différentielle suivante :

$$\alpha'' + \left(A - ik\frac{p}{V}\right)\alpha' + \left(B + iC\frac{p}{V}\right)\alpha = 0$$

où α'' et α' représentent respectivement les dérivées seconde et première de α par rapport à la variable de description du mouvement qui est la distance parcourue ; A, B et C sont des coefficients approximativement indépendants de la vitesse, proportionnels à la masse volumique de l'air et correspondant respectivement à l'amortissement aérodynamique, au rappel aérodynamique et à l'effet Magnus. L'effet gyroscopique est représenté par le terme $\left(\frac{kp}{V}\right)\alpha'$ où k est le rapport du moment d'inertie axial au moment d'inertie transversal, et $\frac{p}{V}$ le rapport pratiquement constant de la vitesse de roulis à la vitesse du véhicule.

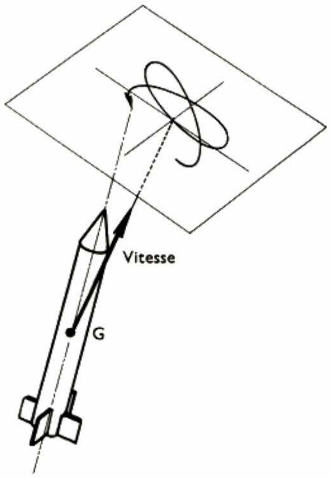
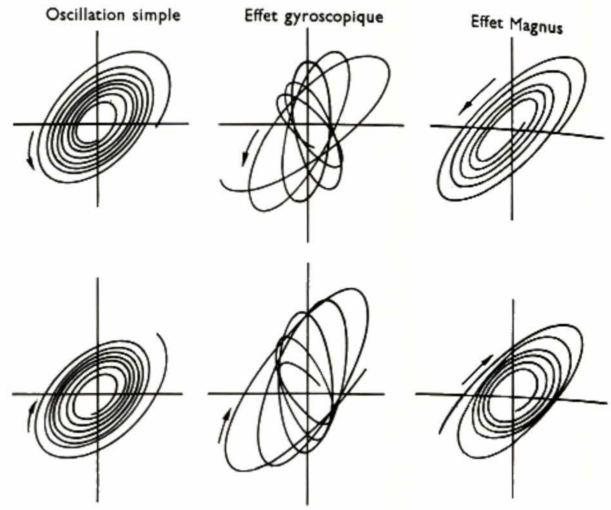


Fig. III-31
Oscillations d'incidence



Toutes les propriétés de l'oscillation d'incidence découlent de cette équation. On établit ainsi les résultats suivants :

a) En conditions pratiquement figées, c'est-à-dire si la masse volumique de l'air varie peu au cours d'un train d'oscillations, chaque oscillation s'accomplit — que la vitesse varie ou non — sur une distance fixe (longueur d'onde) d'autant plus grande que l'altitude est plus élevée ; les oscillations sont amorties mais d'autant moins que l'altitude est plus grande. En outre, toute oscillation est une combinaison de deux oscillations circulaires, tournant chacune dans un sens et prend en général une allure elliptique, plus ou moins modifiée par les effets gyroscopique et Magnus (fig. III-31).

b) Si le rappel aérodynamique agissait seul, l'oscillation divergerait toujours par suite de la décroissance continue de la masse volumique de l'air, la divergence s'achevant par un basculement régulier de la fusée (quelques degrés par seconde) ou, exceptionnellement, par l'immobilité du véhicule à incidence non nulle (fig. III-32).

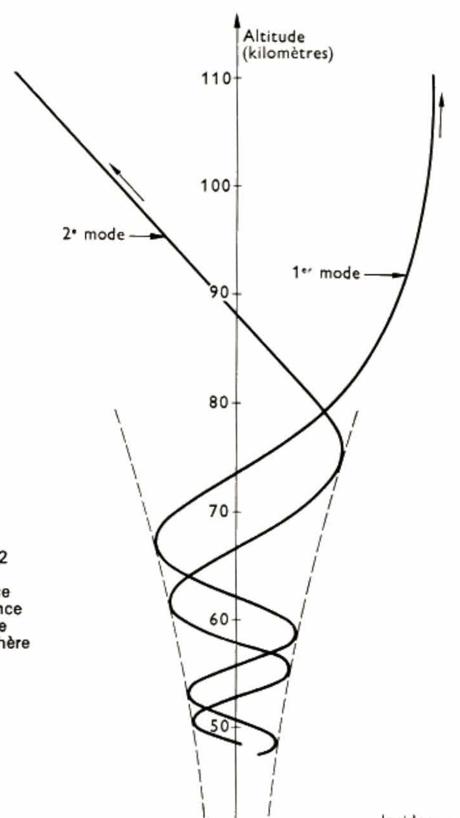


Fig. III-32
Divergence de l'incidence à la sortie de l'atmosphère

c) L'amortissement aérodynamique surclasse à basse altitude l'effet déstabilisant de la raréfaction de l'atmosphère mais son efficacité disparaît à haute altitude et l'oscillation finit par diverger, comme cela est indiqué ci-dessus (V. fig. III-32).

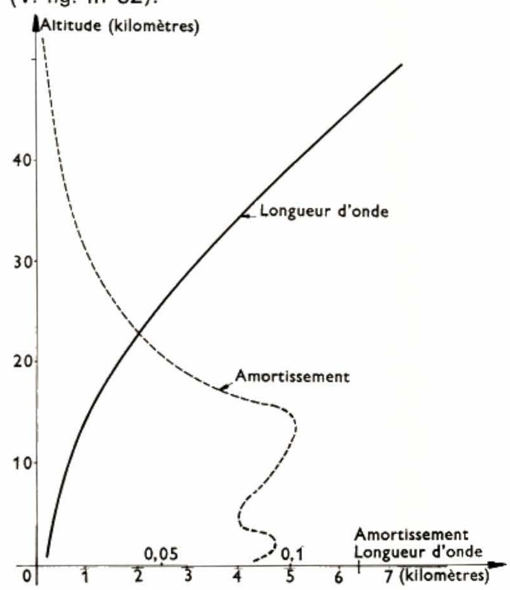


Fig. III-33 — Variation de la longueur d'onde et de l'amortissement en fonction de l'altitude (Bélier III)

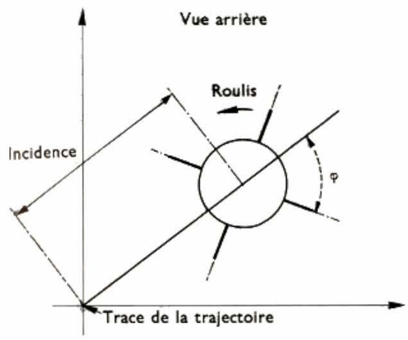
d) L'effet gyroscopique élimine la divergence à haute altitude, l'oscillation d'incidence s'achevant alors par un mouvement conique de la fusée (mouvement Euler-Poinsot) ou, exceptionnellement, par l'immobilité.

e) L'effet Magnus, quel que soit son signe, amortit l'un des modes oscillatoires mais diminue l'amortissement de l'autre.

2° *La résonance.* — La résonance de l'oscillation d'incidence est un phénomène qui débute à petite amplitude mais peut, dans des circonstances défavorables, être la cause d'un accroissement excessif de l'incidence. Elle résulte d'une excitation synchrone de l'oscillation par une action perturbatrice attachée à la fusée et tournant en roulis avec elle, par exemple, un défaut d'alignement du jet propulsif ou un calage défectueux d'empennage. Le phénomène apparaît quand la pulsation de l'incidence et la vitesse de roulis sont égales ; cette rencontre ne manque en général pas de se produire au cours d'un vol car la pulsation de l'incidence et la vitesse de roulis varient différemment. Cependant, s'il est vrai que, en conditions figées, l'incidence de la fusée risque d'être considérablement amplifiée par rapport à l'incidence d'équilibre sans roulis, géné-

ralement on choisit la vitesse de roulis de telle sorte que les conditions de résonance soient rapidement traversées. Ainsi le phénomène reste tolérable.

3° *Les phénomènes de grande amplitude.* — Il peut arriver (par exemple, à l'issue d'une traversée de résonance mal prévue) que l'amplitude de l'oscillation atteigne une valeur de quelques degrés; le moment de roulis induit par l'incidence biaise peut alors « verrouiller » l'angle de roulis de la fusée sur l'argument de l'incidence complexe (à la manière dont le rotor d'un moteur électrique synchrone « se verrouille » sur le champ magnétique tournant) et contraint la vitesse de roulis de la fusée à suivre la pulsation d'incidence: c'est le *roll lock-in* (fig. III-34). Ce phénomène maintient alors des conditions néfastes de *résonance* *persistante* ; il peut même engendrer un *lacet catastrophique* par suite de l'apparition, à grande incidence, du moment transversal dû à l'incidence biaise.



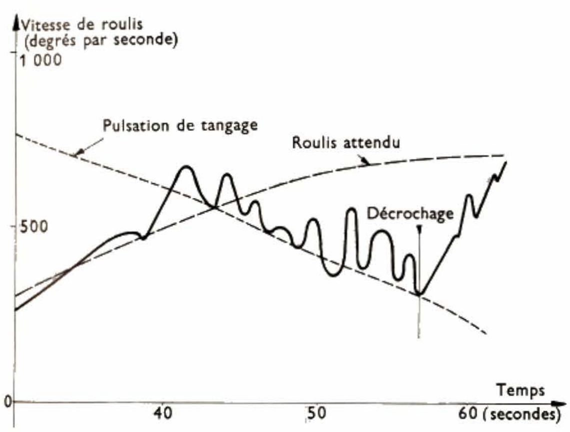


Fig. III-34 — « Roll lock-in ». Le moment de roulis, fonction cyclique de l'angle φ, parvient parfois à « verrouiller » l'attitude relative de la fusée, notamment à la traversée de la résonance roulis-tangage

4° *L'influence du vent pendant la montée.* — Le vent $\overline{W}(Z)$, fonction de l'altitude, est un facteur de déviation de la trajectoire pendant la montée. On étudie ses effets en décomposant l'atmosphère en couches d'épaisseur dZ, chacune d'elles provoquant une oscillation d'incidence à l'issue de laquelle la trajectoire s'est modifiée d'un angle $d\gamma$ proportionnel à $\overline{W}(Z)\,dZ$; cette déviation s'amplifie ensuite selon le mode lentement divergent du mouvement angulaire (fig. III-35), en sorte que la déviation finale de la trajectoire, à une altitude de référence suffisamment élevée s'exprime par l'intégrale:

$$\Delta\gamma_f = \int_0^{Z_f} A(Z)\,\overline{W}(Z)\,dZ$$

où $A(Z)$ est la fonction de sensibilité de la pente γ_f au vent $\overline{W}(Z)$. Cette fonction ne peut être déterminée à basse altitude (notamment en sortie de rampe) que par un calcul complet du mouvement angulaire. Mais plus haut, après quelques centaines de mètres de parcours, elle prend la forme simple suivante:

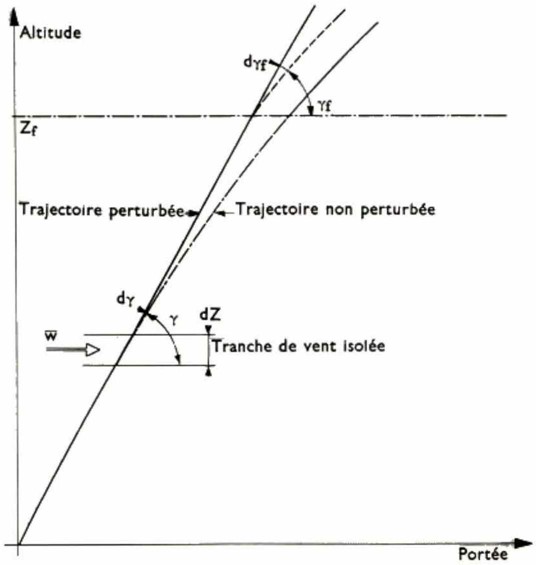


Fig. III-35 — Effet élémentaire d'une tranche de vent sur la trajectoire. À l'issue de la traversée de la tranche dZ, la trajectoire a dévié de l'angle dγ qui s'amplifie jusqu'à dγf à l'altitude finale conventionnelle Zf

$$A(Z) \sim \frac{g + \Gamma}{V^3}\left(\frac{\Delta\gamma_f}{\Delta\gamma}\right)$$

où Γ est l'accélération de la fusée et $(\Delta\gamma_f/\Delta\gamma)$ le rapport d'amplification de la déviation de trajectoire, donné par le mode lentement divergent. Cette formule traduit le fait que malgré l'oscillation d'incidence déclenchée par la traversée de la couche *dZ*, la trajectoire dévie comme si la fusée était restée toujours à incidence nulle, y compris dans la couche.

En pratique, le calcul de la fonction de sensibilité au vent $A(Z)$ pendant la montée n'est pas séparé du calcul relatif à la sortie de rampe.

3.2.4. Mouvement dans le vide. — Après la traversée de l'atmosphère sensible, le mouvement angulaire d'une fusée-sonde est le prolongement de l'oscillation d'incidence antérieure, ce qui lui confère un caractère aléatoire. Si la fusée ne tourne pas en roulis, elle bascule lentement (quelques degrés par seconde) dans un plan contenant pratiquement la direction de la trajectoire. Si la fusée tourne en roulis, son axe décrit lentement un cône d'autant plus fermé que la vitesse de roulis est plus grande; pour un roulis de quelques tours par seconde, l'ouverture de ce cône reste de l'ordre de quelques degrés. Le roulis fige ainsi l'attitude en sortie d'atmosphère. Le mouvement est du type *Euler-Poinsot ;* sa pulsation ω est liée à la vitesse de roulis p et au rapport $\frac{I_x}{I}$ des moments d'inertie axial et transversal par la formule:

$$\omega = \frac{I_x}{I}\,p$$

Le rapport $\frac{I_x}{I}$ étant généralement voisin de 0,01 à 0,05 pour les fusées élancées, il s'ensuit que la pulsation est faible.

Si une phase propulsée doit se dérouler dans le vide, le roulis est nécessaire pour stabiliser la fusée par effet gyroscopique; l'orientation initiale est alors imposée soit par la direction de la trajectoire en sortie d'atmosphère (quand la phase propulsée prolonge la traversée de l'atmosphère), soit par un système automatique de pointage. Grâce à la vitesse de roulis p, le moment perturbateur M dû au mésalignement du jet qui, autrement, aurait un effet désastreux, agit à la façon d'une simple percussion angulaire et engage la fusée dans un petit mouvement conique festonné dont l'axe moyen est écarté de la direction initiale de la fusée de l'angle Δ :

$$\Delta = \frac{M}{I_x p^2}$$

Compte tenu également de l'inévitable percussion de séparation de l'étage antérieur ou de la case d'équipements réalisant le pointage, on parvient à maintenir en dessous de 1° l'écart entre l'axe moyen de la poussée et la direction initiale de pointage.

3.2.5. Mouvement à la rentrée dans l'atmosphère. À la rentrée dans l'atmosphère sensible, une fusée-sonde tend à s'aligner sur la direction descendante de la trajectoire. L'écart initial, généralement très important, engendre une oscillation d'incidence de grande amplitude qui converge d'abord; plus bas, si l'amortissement aérodynamique de tangage est prépondérant, l'oscillation continue de converger. Elle diverge si cet amortissement est surclassé par l'effet défavorable du freinage atmosphérique. Tel est le cas fréquent des ogives peu élancées que l'on sépare de la fusée avant la rentrée. Le mouvement, dans son ensemble, est tout à fait analogue au mouvement à la sortie d'atmosphère, mais pris à rebours.

Pour faciliter la récupération des ogives, il est avantageux d'augmenter le freinage atmosphérique naturel avant l'ouverture des parachutes; on donne alors à l'ogive une forme et un centrage tels qu'elle soit stable à une incidence voisine de 90° et tombe à plat. Dans ce cas, le mouvement angulaire est complexe car les phénomènes aérodynamiques associés sont gouvernés par des décollements généralisés.

3.3. Correction de tir et dispersion. — Les études de mécanique du vol des fusées-sondes sont motivées non seulement par la nécessité d'assurer le succès de la mission mais aussi par l'objectif d'une certaine précision du tir. Pour des raisons évidentes de sauvegarde, il est nécessaire qu'une fusée-sonde retombe dans une zone prévue à l'avance. Cela implique la connaissance du point d'impact nominal et de la dispersion du véhicule.

Le calcul d'un certain nombre de trajectoires, dans lequel chaque tronçon est traité à l'aide du modèle mathématique le mieux approprié (sortie de rampe, traversée de l'atmosphère, arc balistique, rentrée), fournit les angles nominaux de rampe (site et azimut) qui correspondent au point d'impact visé ainsi que la sensibilité de ce point aux variations des angles de rampe. De la même manière on dresse une table de sensibilité des deux coordonnées de l'impact aux diverses variations envisageables, les unes, qui seront connues lors du tir (charge utile, masse exacte de propergol, vent moyen dans chaque couche d'atmosphère, etc.), les autres qui restent aléatoires et ne sont connues que par leurs caractéristiques statistiques (défaut d'alignement du jet, décalage d'empennage, rafales, percussion de séparation, impulsion réelle de chaque étage propulsif).

L'ensemble des variations connues est compensé par une correction des angles de rampe ramenant l'impact au point visé. Notamment, la correction de vent est calculée immédiatement avant le tir à la suite d'un sondage de l'atmosphère par ballon et de mesures locales de vent au voisinage de la rampe.

Les perturbations aléatoires, qui échappent par nature à toute correction, sont responsables de la dispersion du point d'impact, définie usuellement par les écarts-types de ses deux composants (dans le plan de tir et transversalement au plan de tir); le premier est parfois un peu plus grand en raison de sa sensibilité à l'impulsion des étages propulsifs et à la percussion en sortie de rampe.

Globalement, l'écart-type du point d'impact d'une fusée bien construite et bien tirée est proche de 10 à 20 km, pour une altitude de culmination de 100 km, soit l'équivalent d'une incertitude de 1 à 2° sur la direction de tir. Approximativement, cette dispersion est proportionnelle à l'altitude de culmination et il devient avantageux d'équiper les fusées qui montent très haut, d'un pilotage automatique interdisant tout écart d'attitude pendant au moins une partie du vol. La mécanique du vol de ces fusées s'apparente alors à celle des lanceurs de satellites et des missiles balistiques.

4. LA MISE EN ORBITE DES SATELLITES

En première approximation, le problème du lancement est du même genre, sinon du même ordre de grandeur que celui qui vient d'être traité. Il en diffère essentiellement par la nécessité de communiquer au satellite, une fois l'altitude désirée atteinte, la vitesse nécessaire à la satellisation. Cela suppose qu'à la suite de la phase balistique, on procède à une dernière phase propulsive au moment où la vitesse de l'engin est dirigée convenablement, c'est-à-dire parallèlement à la surface terrestre. Compte tenu de ce qui a été développé au paragraphe précédent, on conçoit qu'il s'agisse là d'une opération complexe car la trajectoire doit être rigoureusement respectée et, à tout le moins, doit pouvoir être corrigée.

Les orbites peuvent être classées en deux catégories principales :

— les orbites orientées dans un plan orthogonal à l'axe de lutions, le satellite repasse à la verticale des mêmes points de la surface terrestre. Ce type d'orbite permet, en particulier, la surveillance de ce qui se passe à la surface de la terre : observation météorologique, détection de ressources terrestres, surveillance militaire... Un groupe de quelques satellites convenablement espacés sur une orbite polaire peut être utilisé dans un réseau de télécommunications;

— les orbites orientées dans un plan orthogonal à l'axe de rotation de la Terre. Sous réserve que le satellite soit placé à une altitude déterminée et animé d'une vitesse convenable dans un plan équatorial, il pourra être géostationnaire, c'est-à-dire paraître stationnaire dans un système d'axes lié à la Terre.

Des satellites géostationnaires sont utilisés en télécommunications; leur emploi apparaît principalement adapté à la téléphonie et à la télévision.

Quel que soit le type d'orbite recherché, la satellisation est obtenue lorsque la force d'inertie centrifuge du mobile résultant de la vitesse qui lui a été communiquée est exactement équilibrée par la force d'attraction de la Terre à l'altitude considérée. Le tableau ci-après donne la correspondance de quelques altitudes, vitesses et durées de révolution.

Altitude (kilomètres)	Vitesse (mètres par seconde)	Durée de révolution
300	7 730	1 h 30 mn 30 s
500	7 620	1 h 34 mn 30 s
1 000	7 360	1 h 45 mn
2 000	6 900	2 h 7 mn 10 s
4 000	6 200	2 h 55 mn 20 s
6 000	5 680	3 h 48 mn 20 s

Quant à l'altitude d'un satellite synchrone, elle doit être de 36 000 km et sa vitesse d'environ 3 070 m/s.

La vitesse qui, à une altitude déterminée permet à un mobile de rester sur une orbite circulaire, est sa vitesse caractéristique V_c.

Pour une vitesse inférieure, l'orbite serait elliptique; le point de mise en vitesse sur l'orbite serait son apogée et le périgée aurait une altitude inférieure : il y aurait donc, à plus ou moins longue échéance, retour à la Terre.

Pour une vitesse supérieure, mais néanmoins inférieure à $V_c\sqrt{2}$, la trajectoire serait une ellipse dont le point de mise en vitesse serait le périgée.

Pour une vitesse supérieure à $V_c\sqrt{2}$, dite *vitesse de libération*, le mobile s'éloignerait définitivement de la Terre, sur une orbite parabolique, voire, à la limite, hyperbolique.

5. LA STABILISATION D'ATTITUDE DES SATELLITES

En règle générale, l'attitude d'un satellite, c'est-à-dire son orientation autour de son centre d'inertie, ne peut être laissée entièrement libre tout au long du vol orbital : les diverses nécessités des missions (observation, télécommunications, captation de l'énergie solaire, correction d'orbite) requièrent une stabilisation plus ou moins complète de l'attitude, allant de la simple rotation autour d'un axe principal d'inertie, aux formes les plus élaborées

du pilotage automatique. Selon la phase de la mission, cette stabilisation assure une ou plusieurs des fonctions suivantes : acquisition grossière ou fine de l'orientation voulue, amortissement du mouvement angulaire, compensation des moments perturbateurs résultant de l'environnement spatial. Ce dernier aspect est très important dans le cas d'une stabilisation prolongée : malgré la haute altitude à laquelle il évolue un satellite reste, en effet, soumis à des moments ténus, dont la cause peut être aérodynamique, magnétique, gravitationnelle ou due à diverses radiations. Ces moments agissent en tant que perturbations indésirables et sont perceptibles par leurs effets cumulatifs, mais on en tire aussi parti pour assurer la stabilisation elle-même.

Il existe une grande variété de dispositifs de stabilisation d'attitude, combinant divers principes mais on peut les classer en deux groupes : les systèmes *passifs* et les systèmes *actifs*. Les premiers fonctionnent sans apport d'énergie tandis que les seconds puisent de l'énergie dans une source extérieure et comportent, en outre, des boucles d'asservissement. La frontière entre les deux groupes n'est toutefois pas nette : certains systèmes peuvent être définis comme *semi-passifs* car la fourniture d'énergie est nécessaire mais reste régie par une logique très simple (par exemple, entretien de la rotation d'un volant) et d'autres peuvent être considérés comme *semi-actifs* car des boucles d'asservissement existent mais ne concernent qu'une petite partie de la stabilisation du satellite.

5.1. Stabilisation passive des satellites. — Par une utilisation judicieuse des propriétés du milieu ambiant, les systèmes de stabilisation passive d'attitude peuvent conférer aux satellites une stabilité naturelle où se retrouvent deux fonctions complémentaires : la fonction *orientation*, qui tend à aligner des directions liées au satellite sur certaines directions privilégiées de l'espace, et la fonction *amortissement* qui tend à réduire l'amplitude des oscillations autour de ces directions.

5.1.1. Stabilisation par rotation. — Ce procédé très employé, est fondé sur les propriétés inertielles des corps solides : on communique au satellite une certaine vitesse de rotation autour de son axe de plus grande inertie et la direction de celui-ci se trouve ainsi figée. Plus précisément, le moment cinétique engendré de cette manière constitue une direction de l'espace, fixe en première approximation, autour de laquelle l'axe du satellite précessionne avec un angle de nutation, d'autant plus faible que les conditions initiales sont moins perturbées. Toute dissipation interne d'énergie tend d'ailleurs à amortir le mouvement de précession car la coïncidence de l'axe de plus grande inertie

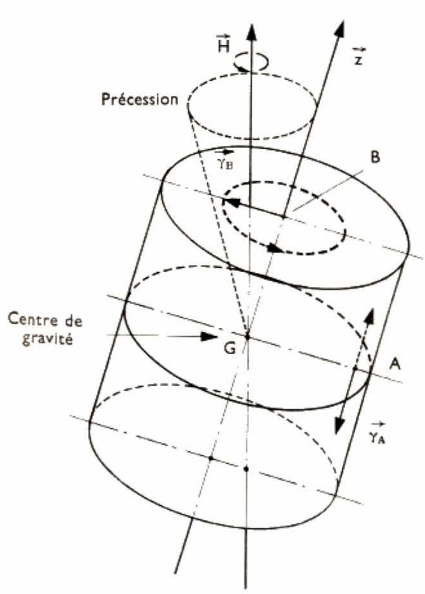


Fig. III-36

Amortissement de la précession d'un satellite stabilisé par rotation. La précession crée un champ d'accélération cyclique $\vec{\gamma}$ qui excite à la résonance des masselottes guidées, placées en A ou B et provoque une dissipation d'énergie. Les réactions de contact redressent progressivement l'axe $\vec{z}$ vers le moment cinétique $\vec{H}$

et du moment cinétique correspond à un minimum d'énergie cinétique. On utilise d'ailleurs des amortisseurs de précession (ou de nutation) pour organiser rationnellement cette dissipation (fig. III-36) et on parvient à annuler l'angle de nutation en quelques dizaines de tours avec un système d'amortisseurs ne dépassant pas 1 % de la masse du satellite.

Le rapport entre le moment d'inertie axial et le moment d'inertie transversal se situe en général autour de 1,2 ; cette valeur assure à la fois la stabilité et un fonctionnement franc des amortisseurs de précession. Un rapport inférieur à l'unité serait inadmissible car la dissipation d'énergie interne ferait diverger l'angle de nutation.

La stabilisation par rotation est imparfaite en deux points. Premièrement, la direction du moment cinétique du satellite dérive sous l'effet des moments perturbateurs transversaux appliqués au satellite. Cependant, on sait maintenir cette dérive à un niveau acceptable (inférieur à 1° par jour) en faisant tourner le satellite à 1 radian par seconde ou plus. Deuxièmement, la vitesse de rotation diminue régulièrement sous l'effet des courants de Foucault induits dans le satellite qui tourne dans le champ magnétique terrestre ; si la stabilisation par rotation doit durer plusieurs mois, il peut s'avérer nécessaire de relancer la rotation périodiquement par un moyen actif (éjection de gaz).

Pour mettre fin à la stabilisation par rotation, on utilise souvent un système passif appelé *yoyo* dont la libération provoque un transfert de moment cinétique entre le satellite et des masselottes éjectées par effet centrifuge (fig. III-37).

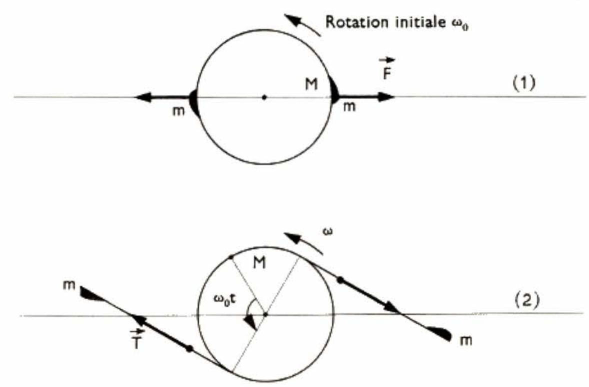


Fig. III-37 — Arrêt de la rotation par yoyo. A leur libération (1), les masselottes s'écartent sous l'effet de la force d'inertie centrifuge $\vec{F}$ et les brins se déroulent à vitesse uniforme (2). La tension $\vec{T}$ freine la rotation ω qui s'annule pour une longueur déroulée égale à $\left(\sqrt{\frac{I}{2\,m}}\right)$ avec I moment d'inertie, et m masse d'une masselotte)

Par principe, ce système réduit la rotation dans un rapport donné, indépendant de la vitesse initiale et déterminé par les caractéristiques géométriques et inertielles du dispositif ; en particulier, on peut viser l'annulation totale de la rotation mais ce résultat n'est atteint qu'avec une certaine imprécision due aux imperfections de réalisation.

5.1.2. Stabilisation magnétique. — Ce type de stabilisation passive n'est employé que sur des satellites en orbite basse, en raison de la forte décroissance de l'intensité du champ magnétique terrestre avec l'altitude (variation en $1/r^3$, r étant la distance au centre de la terre). Il est le plus fréquemment utilisé pendant la phase transitoire qui précède la stabilisation par gradient de gravité (V. ci-après).

Le satellite est équipé d'un fort aimant permanent (ou d'un électroaimant) solidaire de sa structure et dont le moment magnétique tend constamment à s'orienter suivant les lignes de champ, à la manière de l'aiguille aimantée d'une boussole. Cet aimant stabilisateur confère au satellite une période d'oscillation suffisamment courte (500 secondes sur le satellite INJUN placé en orbite polaire), pour qu'il suive avec une précision voisine du degré les variations de la direction du champ magnétique le long de l'orbite, et ce malgré l'existence des moments perturbateurs.

L'amortissement des oscillations s'obtient au moyen de tiges à hystérésis magnétique qui dissipent de l'énergie

quand la composante du champ magnétique suivant la direction d'une tige varie. Cet amortissement est dosé de façon à obtenir la meilleure précision d'alignement sur le champ magnétique : un freinage trop faible laisserait subsister des oscillations provoquées par les irrégularités de la rotation du champ le long de l'orbite ; un freinage trop fort serait cause d'une erreur de « traînage ».

L'amortissement par hystérésis magnétique est souvent utilisé, indépendamment du système d'orientation, pour annuler complètement la rotation d'un satellite, éventuellement après l'action préalable d'un « yoyo ». Sur un satellite en orbite polaire, les larges variations de la direction du champ magnétique (deux tours par révolution orbitale) permettent au système d'agir convenablement sur les trois composantes de la rotation avec deux faisceaux de tiges, ou plus (fig. III-38). En revanche, sur un satellite en orbite équatoriale, la composante de la rotation normale au plan de l'orbite est mal amortie car elle est approximativement colinéaire avec le champ magnétique. L'amortissement se produit cependant car la non-coïncidence de l'axe géographique et de l'axe géomagnétique interdit, une colinéarité permanente du fait de la rotation terrestre.

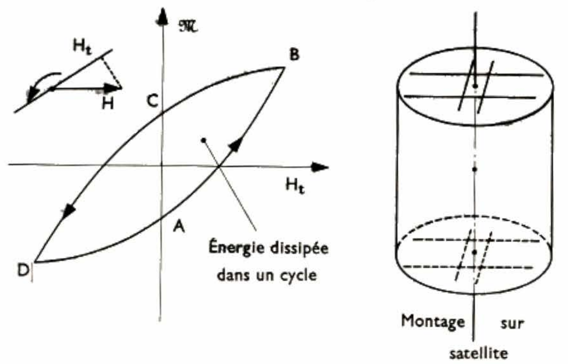


Fig. III-38 — Freinage par hystérésis magnétique. Sur une tige à hystérésis, en rotation dans un champ $\vec{H}$, la composante $\vec{H_t}$ induit un moment magnétique $\mathcal{M}$ qui suit le cycle ABCD. Le montage en croix est adapté à toute condition de rotation et freine en moyenne le satellite

On renforce parfois l'amortissement par hystérésis par l'effet de courants induits dans des bobines entourant les tiges. Le moment qui en résulte est d'autant plus intéressant que la vitesse de rotation est plus grande car il lui est proportionnel, alors que le moment d'hystérésis reste limité par une valeur indépendante de la rotation.

Des systèmes semi-passifs à amplification de l'effet d'hystérésis ont également été envisagés pour des missions en orbite haute.

5.1.3. Stabilisation par gradient de gravité. — Ce type de stabilisation permet de diriger constamment vers le centre de la Terre un axe privilégié du satellite. Son principe repose sur la variation spatiale de l'attraction gravitationnelle (*ou gradient de gravité*) qui engendre, sur un corps solide, un moment tendant à aligner sur la géocentrique locale son axe de plus petite inertie (c'est pour cette raison que de la Terre on voit toujours la même face de la Lune). Sur un satellite compact le moment, proportionnel à la différence entre les moments d'inertie du corps, serait cependant trop faible pour surclasser les perturbations ; aussi, après la mise en orbite, est-il nécessaire, de modifier la configuration du satellite, en déployant un ou plusieurs mâts extensibles qui assurent une augmentation et un étagement convenable des trois moments d'inertie (fig. III-39). Au besoin, la stabilisation peut être rendue triaxiale en différenciant suffisamment les deux plus grands moments d'inertie (fig. III-40) ; le nouvel effet stabilisateur résulte alors du mouvement orbital qui force l'axe dirigé vers le centre de la Terre à tourner régulièrement dans le plan de l'orbite et redresse ainsi l'axe de plus grande inertie perpendiculairement à ce plan.

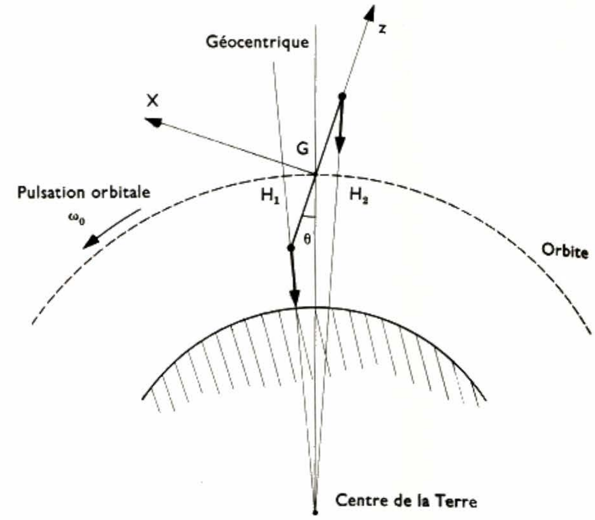


Fig. III-39 — Principe de la stabilisation par gradient de gravité. Sur un satellite en forme d'haltère, la masse la plus proche de la Terre est attirée davantage ; de plus, GH_1 est supérieur à GH_2. Le champ de gravitation tend donc à rappeler l'axe $\vec{z}$ vers la géocentrique. Dans le cas général, le moment en G dépend des moments d'inertie I_X et I_Z et est égal à $(3\,\omega_0^2/2)\ (I_X - I_Z)\ \sin 2\theta$

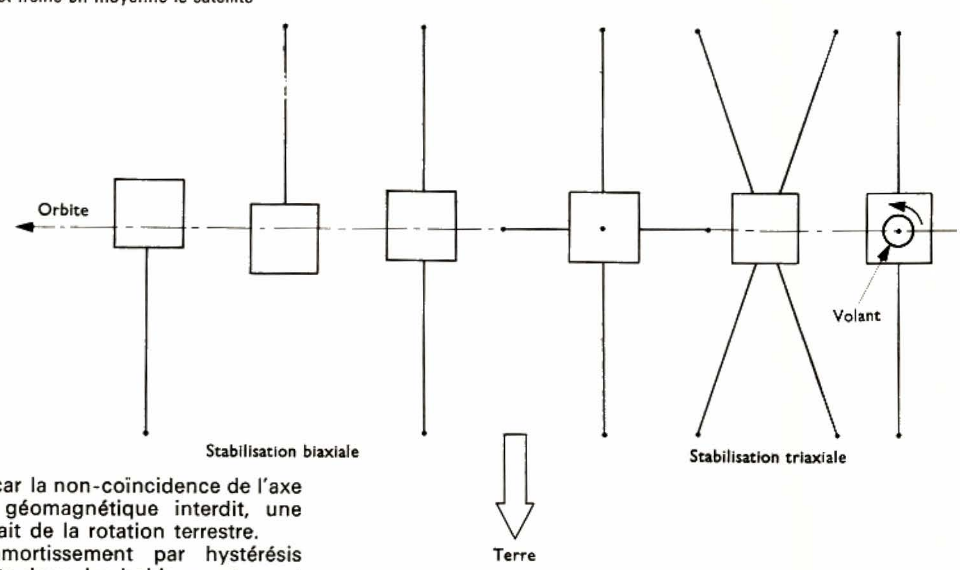


Fig. III-40

Configurations de satellites stabilisés par gradient de gravité

Au voisinage de cette attitude d'équilibre, le satellite oscille autour de ses trois axes sous l'effet des moments gravitationnels et inertiels ; les périodes de ce mouvement de *libration* sont du même ordre de grandeur que la période de révolution orbitale *T*, donc très longues : par exemple,

un satellite équipé d'un seul mât et, par conséquent, non stabilisé en cap oscille suivant deux modes dont les périodes sont respectivement $T/2$ autour de la direction de marche, et $T/\sqrt{3}$ autour de la normale à l'orbite.

On conçoit donc que la *capture* par le gradient de gravité ne puisse se produire que si le satellite a été initialement préorienté et s'il est animé d'une vitesse angulaire de libration très faible. Cela s'obtient souvent en stabilisant provisoirement le satellite par l'intermédiaire du champ magnétique terrestre, puis en érigeant les mâts à l'instant le plus favorable : de cette manière, la vitesse angulaire initiale est pratiquement annulée et le satellite rejoint sa position d'équilibre en oscillant pendant plusieurs jours. À condition que la préorientation du satellite soit suffisamment précise, l'oscillation initiale de capture peut être éliminée sur une fraction de période orbitale en érigeant en deux temps le mât vertical (fig. III-41). Toutefois, si les conditions initiales sont insuffisamment maîtrisées, l'oscillation initiale peut entraîner la « culbute » et c'est la capture en position inverse qui risque finalement de se produire, la stabilisation par gradient de gravité étant possible dans les deux sens. On sait cependant remédier à cette situation malencontreuse en rétractant un tronçon important du mât, après amortissement des oscillations. Cette manœuvre provoque un basculement régulier du satellite (par effet de la conservation du moment cinétique) que l'on arrête par une action inverse, dès que l'attitude redressée est atteinte.

En l'absence des dispositifs appropriés, la vibration d'un satellite stabilisé par gradient de gravité ne serait guère amortie et il est nécessaire de prévoir à bord des systèmes dissipatifs, associés à différentes sortes d'ancrages sur le milieu ambiant (systèmes magnétique, inertiel ou gravitationnel). Ce dernier, le meilleur, s'obtient en insérant, entre les mâts et la structure du satellite, une liaison élastico-visqueuse où se produit la dissipation d'énergie dans le mouvement relatif qui accompagne la libration du satellite.

La stabilisation par gradient de gravité a été utilisée sur de nombreux satellites. Avec la technologie actuelle elle conduit à une précision proche de 1° ; cet écart résulte évidemment des moments perturbateurs habituels mais aussi de la déformation thermique des mâts et de l'effet de l'excentricité éventuelle de l'orbite qui rompt la régularité de la rotation.

Certaines améliorations peuvent être apportées à la stabilisation par gradient de gravité en équipant le satellite de volants en rotation entretenue et montés de diverses façons. Ces volants permettent, soit d'obtenir une stabilisation en cap sur les satellites équipés d'un seul mât, soit de fournir un ancrage inertiel pour l'amortissement de la libration.

5.1.4. Autres types de stabilisation passive. — La stabilisation des satellites peut aussi être assurée, de façon passive, en tirant parti soit des forces aérodynamiques, soit de la pression de radiation solaire.

1° *La stabilisation aérodynamique* n'est utilisable que sur les satellites en orbite basse ; elle consiste à équiper l'arrière du satellite d'un empennage léger : la force aérodynamique appliquée à cet empennage tend à le coucher dans le lit du vent relatif et, par conséquent, à aligner un axe privilégié du satellite sur le vecteur vitesse. Cette force, proportionnelle à l'angle d'*incidence* et à la masse volumique de l'air ambiant, est suffisante pour surclasser, à faible incidence, toutes les perturbations (notamment la pression de radiation solaire) à condition que l'altitude soit inférieure à 500 km : par exemple, sur un satellite en orbite circulaire d'altitude 300 km, un empennage de 1 m^2 est soumis à une force de 10^{-3} N par radian d'incidence, tandis que la force due à la pression de radiation solaire atteint 10^{-5} N au maximum.

Par principe, l'empennage confère au satellite sa stabilité en *tangage* et en *lacet* mais ne le bride pas en *roulis* (fig. III-42) ; néanmoins, la stabilisation peut être rendue triaxiale en équipant le satellite d'un gyroscope dont le

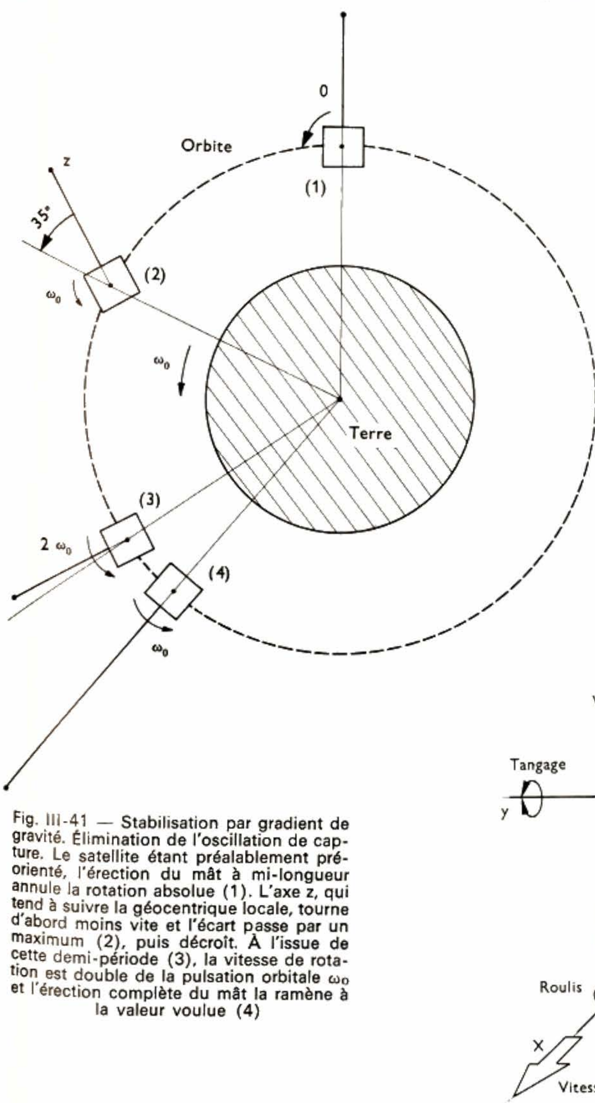


Fig. III-41 — Stabilisation par gradient de gravité. Élimination de l'oscillation de capture. Le satellite étant préalablement préorienté, l'érection du mât à mi-longueur annule la rotation absolue (1). L'axe z, qui tend à suivre la géocentrique locale, tourne d'abord moins vite et l'écart passe par un maximum (2), puis décroît. À l'issue de cette demi-période (3), la vitesse de rotation est double de la pulsation orbitale ω_0 et l'érection complète du mât la ramène à la valeur voulue (4)

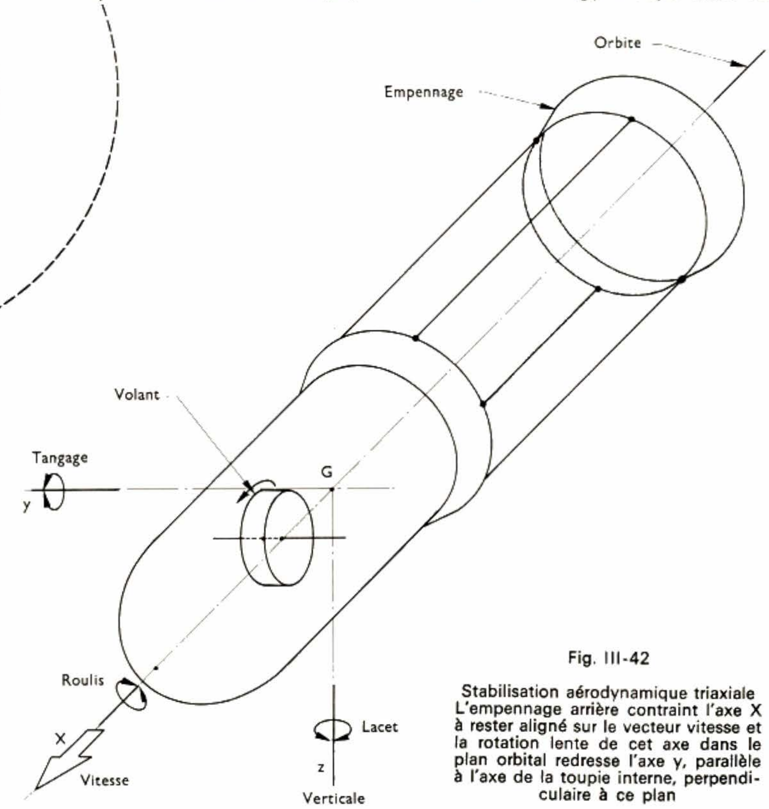


Fig. III-42

Stabilisation aérodynamique triaxiale L'empennage arrière contraint l'axe X à rester aligné sur le vecteur vitesse et la rotation lente de cet axe dans le plan orbital redresse l'axe y, parallèle à l'axe de la toupie interne, perpendiculaire à ce plan

moment cinétique est orienté perpendiculairement au plan de l'orbite. À condition qu'il soit convenablement suspendu à bord et que les liaisons dissipent de l'énergie, ce gyroscope est en outre apte à amortir, par ancrage inertiel, les oscillations du satellite autour de sa position d'équilibre. La stabilisation aérodynamique a été utilisée sur le satellite soviétique Cosmos 149.

2° *La stabilisation d'attitude par la pression de radiation solaire* est un procédé qui n'a pas encore été utilisé mais qui reste envisageable pour certaines missions. De grandes surfaces, disposées à l'arrière du satellite comme des empennages seraient soumises, du fait de la pression de radiation solaire, à une force dépendant de leur incidence par rapport à la direction du soleil et tendraient ainsi à diriger constamment un axe privilégié du satellite vers le soleil. Quelle que soit la surface des empennages, le procédé ne serait efficace que pour les orbites hautes, dont l'altitude de périgée serait supérieure à 1000 km, c'est-à-dire lorsque les forces aérodynamiques perturbatrices seraient nettement plus faibles que la force d'orientation. Les surfaces stabilisatrices devraient néanmoins être particulièrement vastes pour s'opposer à toutes les autres perturbations, magnétiques notamment, ce qui pose de difficiles problèmes techniques.

5.2. Stabilisation active des satellites. — La stabilisation active consiste à engendrer, au moyen d'une commande appropriée, les moments nécessaires pour brider le satellite au voisinage de l'attitude prescrite. Les actions de commande sont élaborées, selon une certaine logique, à partir des mesures délivrées par des organes de *détection* directement ou indirectement sensibles aux écarts d'attitude. L'ensemble de ces fonctions, associées à la dynamique rotationnelle du satellite, constitue une boucle d'asservissement dont l'étude relève de la théorie des servomécanismes (V. t. 2. Automatismes). Le plus souvent, cette boucle est entièrement organisée à bord du satellite mais on préfère parfois la faire passer par le sol, par l'intermédiaire de stations de télémesure et de télécommande (fig. III-43) ; cette disposition, qui alourdit sans doute la « gestion » du satellite, permet en revanche de traiter convenablement toutes sortes de mesures et d'élaborer des lois de commande optimales.

Plus lourde et plus compliquée que la stabilisation passive, la stabilisation active reste la seule utilisable dans un grand nombre de missions, notamment celles qui requièrent une précision élevée (observations astronomiques, télécommunications à grandes distances, transferts d'orbites interplanétaires) et dans les phases d'acquisition précédant une stabilisation passive par rotation.

5.2.1. Commande. — Il existe plusieurs procédés pour engendrer un moment à bord d'un satellite.

Un premier moyen, utilisable quelles que soient les conditions orbitales, consiste à expulser du gaz vers l'extérieur, au travers d'éjecteurs commandés, convenablement disposés et orientés sur le satellite (fig. III-44) ; les forces induites localement, proportionnelles au débit massique et à la vitesse du jet, permettent de créer à volonté, le plus souvent sous forme d'impulsions brèves, les trois composantes du moment de manœuvre. Selon les satellites, on peut utiliser du gaz froid, emmagasiné sous pression, ou du gaz chaud, provenant de la décomposition d'un ergol chimique. Le gaz froid, d'emploi facile mais conduisant à une importante dépense massique en raison de sa faible vitesse d'éjection (600 m/s), est couramment employé sur les petits satellites qui ne nécessitent que de faibles poussées (quelques newtons au plus). Au contraire, le gaz chaud est éjecté à grande vitesse (2 000 m/s et plus) et il reste réservé aux satellites de grande taille, en raison de son emploi plus difficile.

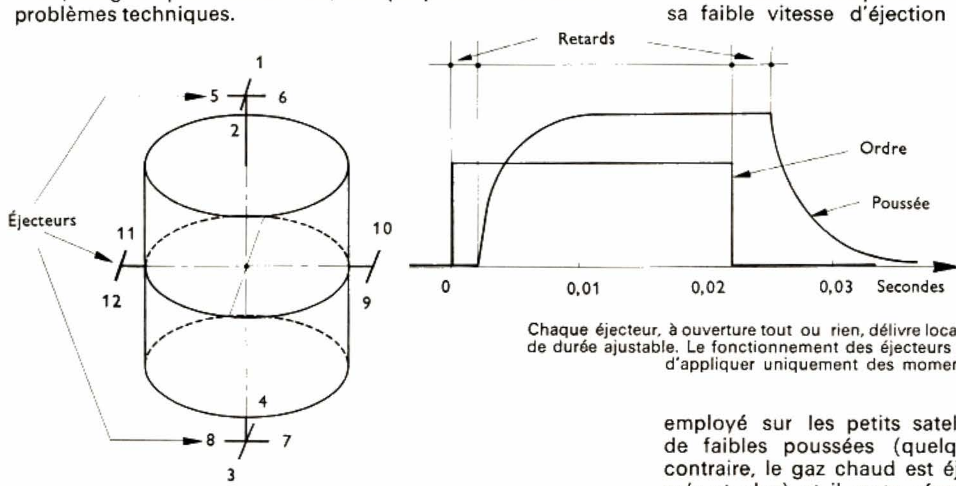


Fig. III-44

Commande par jets de gaz

Chaque éjecteur, à ouverture tout ou rien, délivre localement une poussée de durée ajustable. Le fonctionnement des éjecteurs par couples permet d'appliquer uniquement des moments

L'éjection d'ions, accélérés à grande vitesse (20 000 m/s) et défléchis par un champ électrique, constitue aussi un moyen prometteur pour engendrer un moment à bord d'un satellite. Ce procédé, très avantageux en ce qui concerne la consommation de masse, ne délivre que des moments très faibles et exige une certaine puissance électrique ; le matériel lourd et complexe qu'il implique, ne le rend envisageable que dans des missions de très longue durée.

Pour manœuvrer un satellite en orbite basse, on peut utiliser l'action du champ magnétique terrestre sur un système de solénoïdes, que l'on fait parcourir par des courants électriques convenablement distribués entre les bobines. Ce procédé ne permet d'appliquer à un instant déterminé, qu'un moment perpendiculaire au champ magnétique ; cependant, la variation de la direction absolue

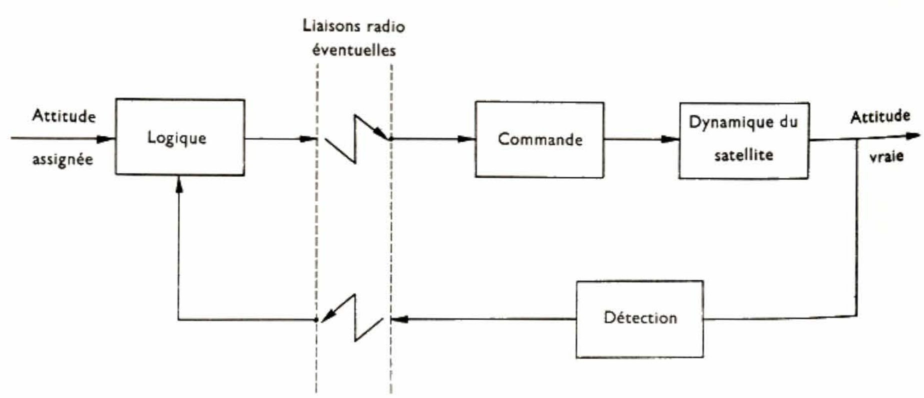


Fig. III-43

Bloc diagramme de la stabilisation active

du champ au cours du mouvement orbital, rétablit la possibilité d'une action complète, répartie dans le temps.

Enfin, un moyen d'action remarquablement précis consiste à pratiquer un échange de moment cinétique entre le satellite lui-même et des volants d'inertie internes (fig. III-45), soit que l'on modifie leur vitesse de rotation, soit que l'on déplace la direction de leur axe (*Control Moment Gyro*). Ce procédé est néanmoins impuissant à équilibrer un couple dont la moyenne ne serait pas nulle car le moment cinétique disponible à bord est limité ; aussi doit-on compléter la commande par un système de *désaturation* des volants, fondé sur l'un des principes évoqués plus haut. Quand la désaturation est faite par éjection de masse, le gain de consommation subsiste néanmoins car celle-ci correspond à la valeur moyenne du moment perturbateur et non aux valeurs maximales, positives ou négatives, comme ce serait le cas sans les volants.

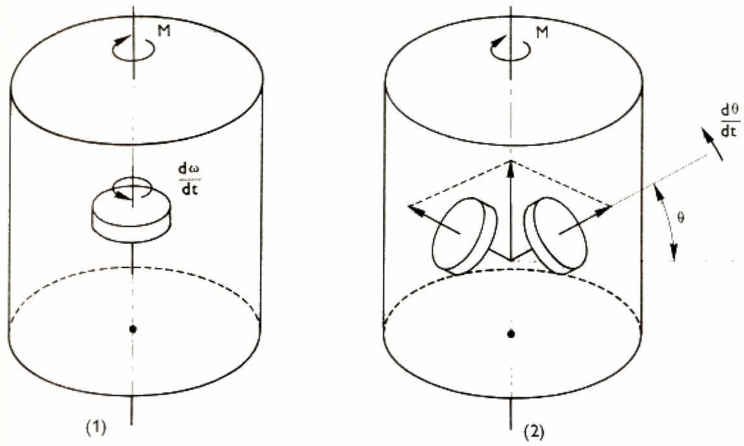


Fig. III-45

Commande par volants
Les variations de vitesse de rotation ω (1) ou d'orientation θ (2) de volants d'inertie exercent par réaction un moment de manœuvre sur le satellite. La commande est saturée quand les volants ont atteint leur vitesse ou leur orientation limites

5.2.2. Détection. — La connaissance complète de l'attitude nécessite la localisation, dans le satellite, de deux directions particulières de l'espace ; les détecteurs ont pour fonction de délivrer des mesures en relation avec ces directions en vue de les repérer après un traitement plus ou moins complexe.

La direction du champ magnétique, parfois utilisée en orbite basse, s'observe au moyen de *magnétomètres* qui mesurent les composantes du champ suivant trois directions orthogonales, liées au satellite.

La verticale locale se repère au moyen de *détecteurs d'horizon*, sensibles au rayonnement infrarouge de l'atmosphère ou à l'albédo terrestre ; ces détecteurs, intégrés dans des mécanismes à balayage ou montés fixes dans les satellites en rotation, décèlent les instants de transition Terre-espace, desquels se déduit la direction de la verticale avec une précision qui atteint une fraction de degré. La variation de la verticale dans une base absolue permet en outre de déterminer la normale au plan de l'orbite.

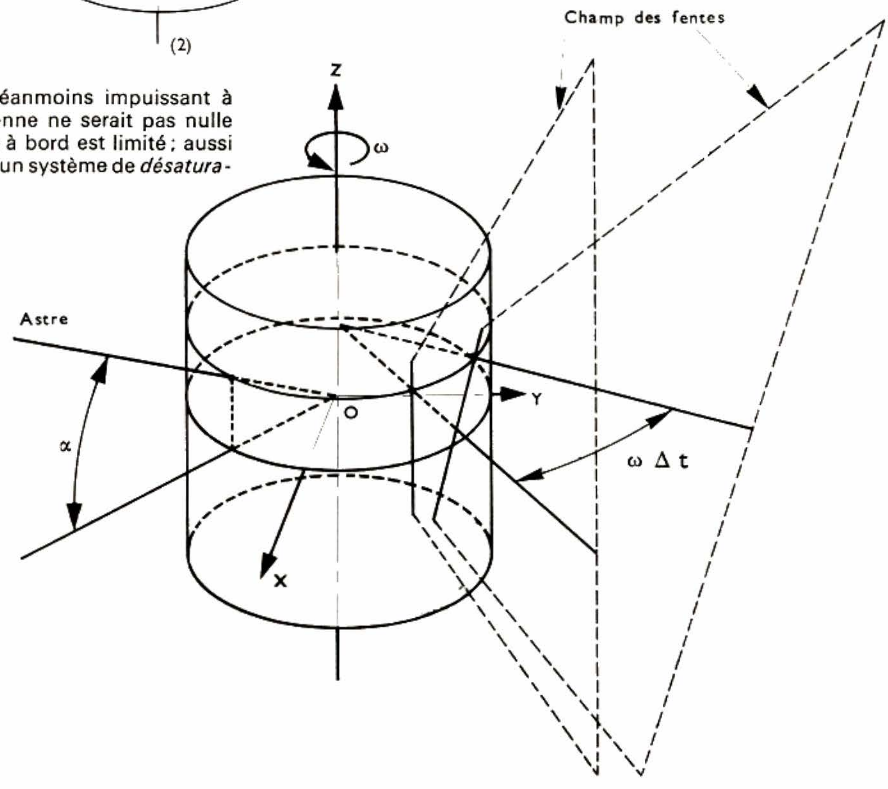


Fig. III-46

Relevé d'une hauteur d'astre sur un satellite tournant
La hauteur α de l'astre (Soleil ou étoile) dans le repère lié au satellite est mesurée par la différence Δt des temps de passage dans une fente méridienne et une fente oblique

Les directions d'astres (Soleil et étoiles brillantes, principalement) constituent des directions privilégiées (fig. III-46) dans les missions interplanétaires. Elles s'observent au moyen de détecteurs fixes ou asservis.

Les *détecteurs solaires* sont équipés de cellules photoélectriques et les *détecteurs stellaires* comportent des photomultiplicateurs qui leur confèrent la sensibilité nécessaire. Pour une même observation d'astre, on utilise fréquemment un couple de détecteurs, l'un à large champ, destiné à l'acquisition de l'astre, l'autre à champ étroit, destiné à la stabilisation précise de l'attitude, ce dernier pouvant atteindre une précision tout à fait remarquable (moins d'une seconde d'arc).

De plus, sur certains satellites ou astronefs très élaborés (cabines Apollo, par exemple), on utilise des plates-formes gyroscopiques comme repères intermédiaires de stabilisation, les dérives inévitables de ces instruments étant évidemment corrigées par visées astrales ou terrestres.

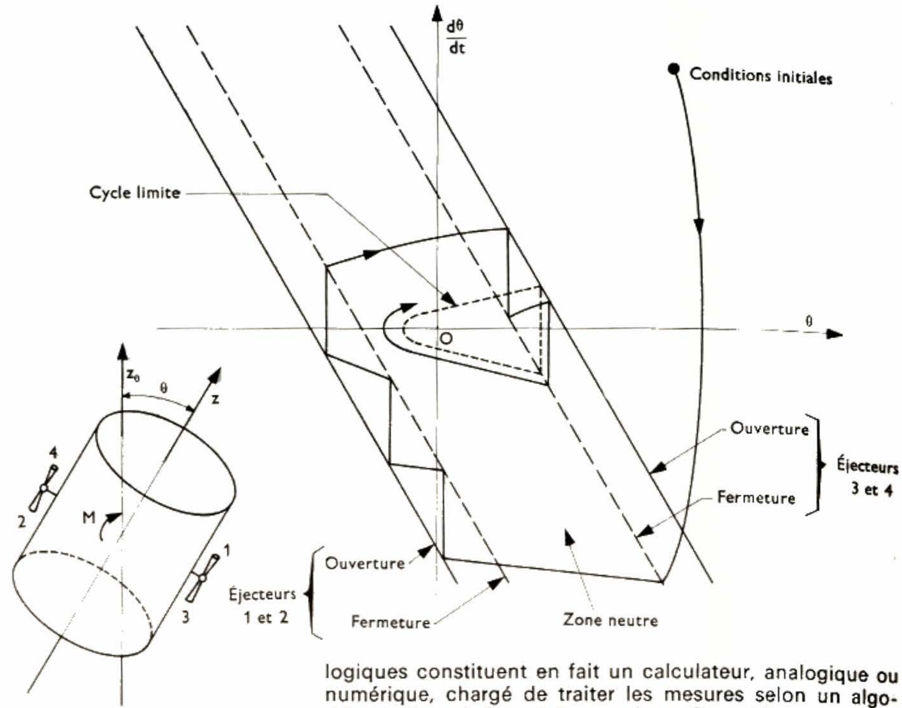


Fig. III-47

Stabilisation active par commande tout ou rien.
En ordonnant l'ouverture et la fermeture des éjecteurs selon la valeur d'une combinaison linéaire de θ et dθ/dt, le point de fonctionnement tend à rallier l'origine O. Le satellite oscille finalement autour de la direction assignée z_0, suivant un cycle limite étroit dont la forme dépend du moment perturbateur

5.2.3. Logique. — Les organes logiques d'une boucle de stabilisation active représentent le maillon de liaison entre les détecteurs et les commandes. À partir des mesures délivrées par les détecteurs, ils ont pour rôle d'élaborer les actions de commande assurant la stabilité du système et satisfaisant un certain compromis de coût et d'efficacité, par exemple, le compromis consommation-précision.

Mis à part les étages d'amplification ou de codage numérique associés aux détecteurs et les étages de puissance associés à la commande, l'ensemble des éléments logiques constituent en fait un calculateur, analogique ou numérique, chargé de traiter les mesures selon un algorithme déterminé, parfois complexe. Quand la structure du système le permet, le calculateur se réduit à un réseau électrique simple dont la tension de sortie (commande) est liée à la tension d'entrée (mesure) par une relation différentielle, comportant au besoin la génération de signaux tout ou rien (fig. III-47). À l'opposé de ce cas répandu, le calculateur peut être un organe hautement performant auquel des calculs compliqués sont demandés pour restituer l'attitude d'abord et agir ensuite de façon optimale sur la commande ; cette conception de la stabilisation est en général associée à l'emploi d'un système de détection, relativement peu organisé mais fiable.

CHAPITRE IV

MATÉRIAUX

1. CARACTÈRES PARTICULIERS DES MATÉRIAUX UTILISÉS DANS LE DOMAINE DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE

1.1. Performances élevées. — Dans le domaine de l'aéronautique et de l'espace, les problèmes d'encombrement et de masse revêtent une importance toute particulière. C'est dire que le matériau choisi pour la fabrication d'une pièce devra permettre de dessiner cette pièce avec les cotes les plus faibles possibles, compatibles avec son utilisation.

Cela explique pourquoi le métallurgiste travaillant dans la construction aéronautique est toujours à la recherche de matériaux présentant des caractéristiques (résistance, limite élastique, dureté,) particulièrement élevées à froid ou à chaud, suivant leur usage.

Aussi, trouve-t-on dans les listes établies pour chaque grande classe d'alliages figurant ci-après, certaines nuances à hautes caractéristiques dont l'utilisation est réservée à l'aéronautique ou à l'espace, le prix payé pour ces caractéristiques n'étant pas justifié pour des applications plus générales.

1.2. Mise en œuvre dans des conditions satisfaisantes. — Les mêmes problèmes d'encombrement et de masse, évoqués ci-dessus, conduisent fréquemment les bureaux d'études d'un constructeur de matériel aéronautique à concevoir des pièces ou des ensembles compliqués et d'une réalisation délicate par l'atelier ; de plus, des matériaux à caractéristiques élevées offrent naturellement plus de difficultés dans les opérations courantes d'usinage, de conformage, d'assemblage, de traitement thermique.

C'est pourquoi le choix du matériau doit tenir le plus grand compte de ces sujétions de mise en œuvre. Ainsi, pour des caractéristiques égales ou très voisines présentées par deux matériaux dont l'emploi est envisagé, on adoptera celui reconnu pour demander un traitement thermique plus simple, offrir des possibilités d'assemblage par soudure plus étendues, ou une plus grande capacité de déformation.

Cette notion de mise en œuvre s'ajoutant à celle des caractéristiques vient donc contribuer à allonger la liste des matériaux à mettre à la disposition du constructeur aéronautique.

1.3. Fiabilité. — La fiabilité d'un matériel peut se définir de façon simplifiée par le nombre d'heures de fonctionnement *sans panne* que l'on est en droit d'en attendre.

Cette qualité intervient donc de façon directe simultanément sur la sécurité et sur le prix de revient d'exploitation du matériel.

Dans le secteur de l'aéronautique, et surtout dans celui de l'espace, les matériels sont particulièrement onéreux de construction et d'exploitation, aussi, une grande fiabilité présente-t-elle encore plus d'intérêt que dans maintes autres branches de l'industrie.

Cependant, c'est avant tout du point de vue de la sécurité qu'une grande fiabilité des matériels est absolument impérative. Une détérioration de cellule, une panne de moteur, le fonctionnement défectueux d'un équipement, qui peuvent mettre en jeu la vie d'un nombre de passagers qui va croissant d'année en année, sont redoutés par les responsables des matériels volants. Avec raison ils exigent la preuve d'une fiabilité satisfaisante avant mise en service de ces matériels.

La matière utilisée dans les fabrications aéronautiques n'est évidemment pas seule en cause, mais elle contribuera à cette bonne fiabilité dans la mesure où ses caractéristiques et sa santé sont plus sûrement garanties.

C'est ce qui justifie l'emploi de matériaux élaborés suivant les techniques les plus avancées, et ayant subi les contrôles les plus sévères.

1.4. Légèreté. — Pour un matériel volant, la légèreté est la qualité première qui vient à l'esprit. On a vu, cependant, que bien d'autres qualités sont exigées des matériaux utilisés pour sa fabrication ; c'est dire que, pour chaque application, on devra choisir le matériau le plus léger, susceptible de rendre le service demandé.

En fait, d'une façon générale, à mesure que la température en service augmente, le choix doit se porter sur un matériau ayant les meilleures caractéristiques spécifiques aux températures envisagées en service (caractéristiques rapportées à la masse volumique). Aussi, ne sera-t-on pas surpris de la grande diversité des matériaux qui se retrouvent sur les matériels volants, et plus particulièrement sur les moteurs d'avion où les températures peuvent être comprises de la température ambiante à près de 1 100 °C, et cela en service de longue durée (la durée demandée dépasse fréquemment 10 000 heures).

1.5. Absence de fragilité. — C'est le caractère impératif de la sécurité qui interdit l'emploi de matières fragiles. Il faut entendre par absence de fragilité, non seulement le fait que le matériau doit subir des variations de contraintes brutales, des surcharges momentanées, mécaniques ou thermiques, des chocs, etc., sans donner lieu à fissures ou ruptures, mais encore que le matériau ne doit pas rompre « sans prévenir ». Ce dernier terme signifie que le dépassement des contraintes admissibles par la matière doit se traduire d'abord par une déformation suffisamment importante des pièces pour entraîner des perturbations sensibles dans le fonctionnement du matériel (frottement, vibrations, usure, perte de puissance, perte de pression, élévation de température, etc.).

En conséquence, une des qualités recherchées par le responsable du choix du matériau sera sa capacité de déformation, appelée aussi *ductilité*. Cette ductilité est exprimée couramment par le métallurgiste sous forme des deux caractéristiques d'allongement de rupture et de striction de rupture.

2. VUE D'ENSEMBLE SUR LES CLASSES DE MATÉRIAUX UTILISÉES DANS L'INDUSTRIE AÉRONAUTIQUE ET SPATIALE

2.1. Critères de choix. — Le constructeur aéronautique ou aérospatial dispose d'une gamme très étendue de matériaux entre lesquels son choix doit se fixer.

Ce choix est déterminé essentiellement par la température en service subie par le matériau.

Cependant, d'autres considérations entrent en jeu, les unes d'ordre technique (comme celles citées au paragraphe 1.1.) les autres d'ordre commercial (facilités d'approvisionnement, prix).

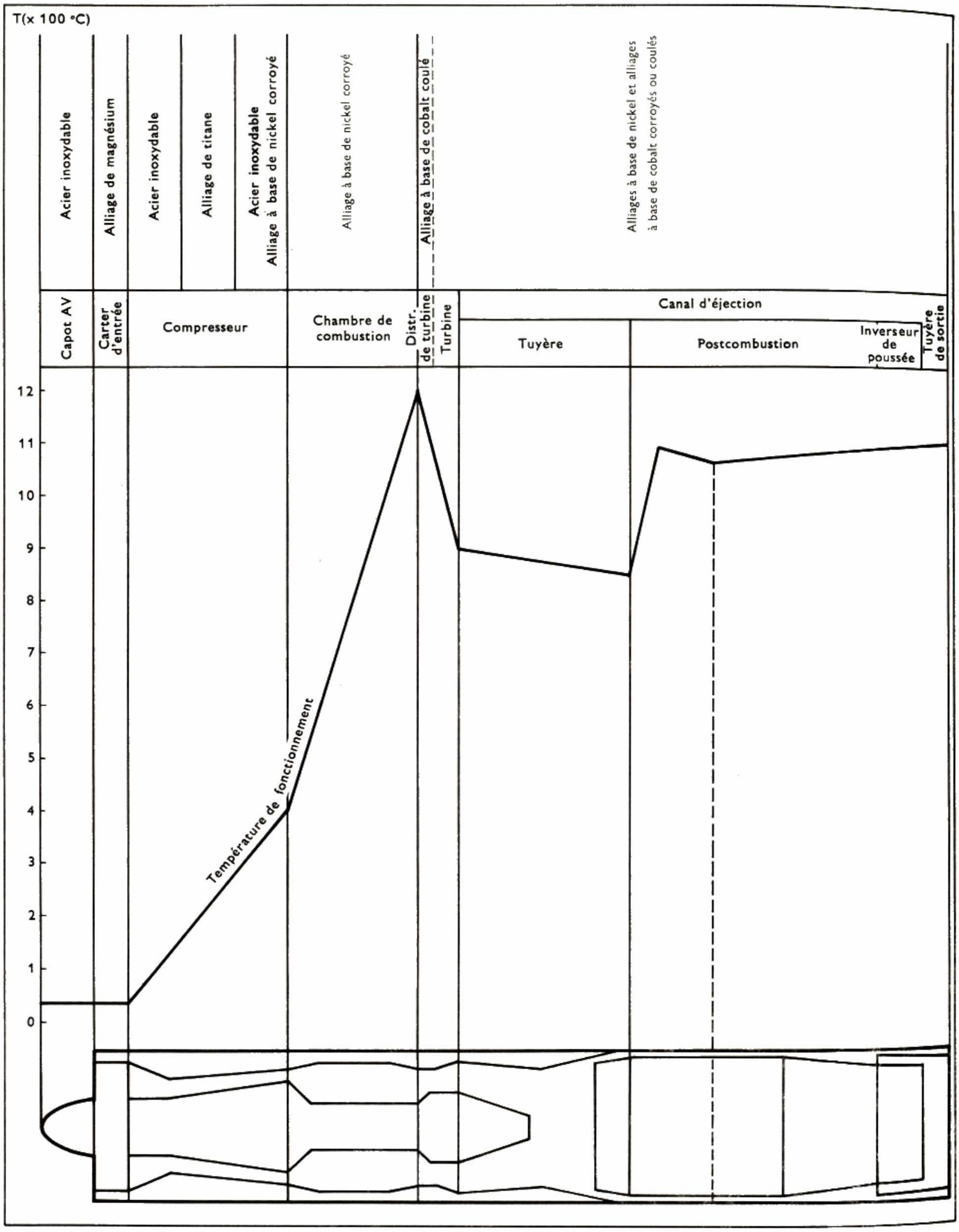
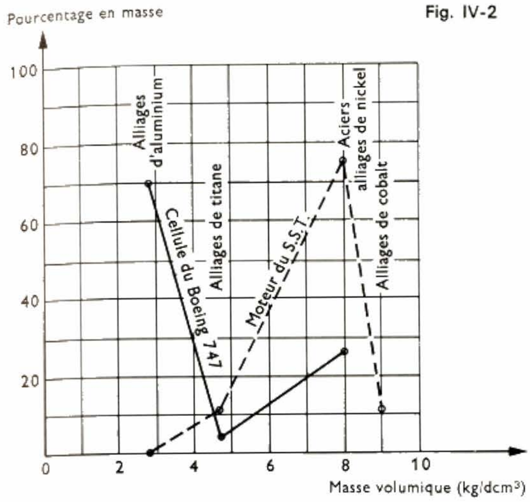


Fig. IV-1 — Répartition des matériaux utilisés dans un turboréacteur en fonction des températures de fonctionnement

Fig. IV-2



Répartition en fonction de la densité des alliages utilisés sur:
— la cellule du Boeing 747
— le moteur du S.S.T.

Le prix du matériau représente naturellement un des facteurs les plus importants retenant l'attention du constructeur. On peut estimer, en effet, que dans un turboréacteur de conception actuelle, le prix de l'approvisionnement (barres, tôles, pièces de forge et de fonderie, etc.) représente sensiblement le tiers du prix total.

2.2. Principaux matériaux métalliques utilisés. — Les matériaux métalliques sont les plus utilisés, mais il y a lieu de souligner que la part des matériaux non métalliques va croissant dans l'industrie aérospatiale.

Les tableaux A et B donnent des informations concernant les pourcentages des divers matériaux utilisés dans la fabrication de la cellule du Boeing 747 (avion subsonique) et dans celle du moteur de l'avion civil S.S.T. (supersonique).

Tableau A

Matériaux utilisés dans la fabrication de la cellule du Boeing 747

Aciers faiblement alliés ....22 % Aciers alliés (inoxydables)........3 %	25 %
Alliages de titane	3,5 %
Alliages d'aluminium	70 %
Alliages divers (cuivre, nickel)	1,5 %

Tableau B

Matériaux utilisés dans la fabrication du moteur du S.S.T.

Aciers alliés	15 %
Alliages de titane	12 %
Alliages d'aluminium	1 %
Alliages de nickel et de cobalt	72 %

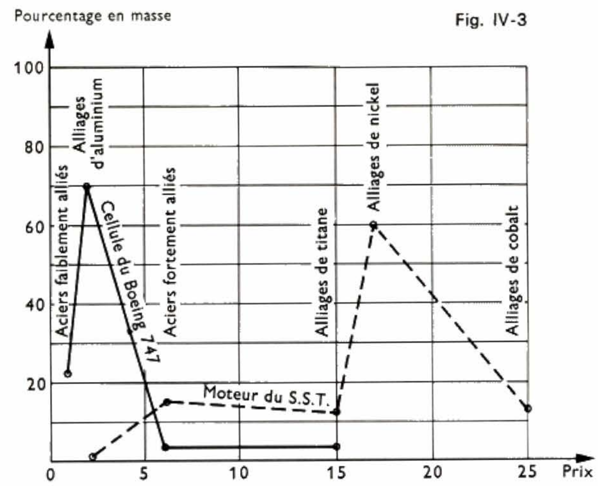
Ces tableaux font ressortir la profonde différence dans le choix des matériaux pour une cellule subsonique, fonctionnant à des températures limitées (70 % d'alliages d'aluminium) et pour le moteur d'un avion supersonique, donc particulièrement chaud (72 % d'alliages de nickel et de cobalt).

2.3. Influence de la température de fonctionnement sur le choix du matériau. — Sur le graphique, (fig. IV-1), on a représenté schématiquement la coupe d'un turboréacteur à postcombustion. La température des matériaux situés dans les zones les plus chaudes de chaque section est portée en ordonnée, et la nature des matériaux choisis est indiquée à la partie supérieure. On en déduit que, pour des températures croissantes, de la température ambiante à 1 200 °C, on devra faire appel successivement aux matériaux suivants:

— alliages de magnésium,
— alliages de titane,
— aciers inoxydables,
— alliages de nickel,
— alliages de cobalt.

2.4. Répercussion du choix, dicté par la température, sur la masse volumique et sur le prix du matériau. — Le graphique, figure IV-2, est établi à l'aide des données des tableaux A et B et de la masse volumique moyenne de chaque classe d'alliages utilisés. Il fait ressortir que pour un matériel supportant des températures élevées en service (moteur), il est nécessaire d'utiliser des matériaux de masse volumique plus grande.

Fig. IV-3



Répartition en fonction du prix des alliages utilisés sur:
— la cellule du Boeing 747
— le moteur du S.S.T.

Sur le graphique de la figure IV-3, on a reporté des coefficients proportionnels aux prix moyens au kilogramme de chaque classe de matériau utilisé. Il en ressort que, pour une même masse, le prix moyen d'approvisionnement pour un réacteur supersonique peut être de l'ordre de quatre fois celui correspondant à une cellule subsonique.

3. MATÉRIAUX POUR FONCTIONNEMENT À DES TEMPÉRATURES FAIBLES OU MOYENNES

3.1. Propriétés diverses exigées. — En dehors des caractéristiques mécaniques que l'on souhaite les plus élevées possible, on demande fréquemment à ces matériaux des propriétés adaptées à un emploi particulier.

Ainsi, on peut citer, sans que cette liste soit limitative :

a) *En ce qui concerne les propriétés intrinsèques du matériau :*

— la résistance aux impacts (parties frontales avant),
— la résistance à la fatigue à haute fréquence (pièces soumises à des vibrations).
— la résistance à la fatigue lente (pièces soumises périodiquement à une contrainte élevée: démarrages, arrêts, changements de régime),
— la résistance au frottement (paliers, roulements),
— la stabilité dimensionnelle,
— la stabilité structurale dans le temps.

b) *En ce qui concerne la mise en œuvre du matériau :*

— l'aptitude à la coulée ou au forgeage,
— l'aptitude au formage,
— l'aptitude à l'usinage,
— l'aptitude au soudage ou au brasage.

Le nombre et la diversité de ces propriétés suffisent à expliquer pourquoi la gamme des matériaux utilisés est très étendue.

Tableau I — Alliages de magnésium

État	Désignation		Composition						Caractéristiques	
	AFNOR	Courante	Mg	Al	Zn	Th	Terres rares	Zr	R	A
Corroyé	GA 3 Z 1		Base	3	1				23	12
Corroyé	GA 7 Z 1		»	8	0,6				29	6
Coulé	GA 9		»	8,5	0,6				17	9
Coulé	GThZ 3	ZT 1	»		2	3		0,7	17	3
Coulé	GZ 5 ThZr	TZ 6	»		5,5	2		0,7	24	3
Coulé	GZ 4 Zr	Z 5 Z	»		4,5			0,7	22	4
Coulé	GZ 4 Tr 1 Zr	RZ 5	»		4		1	0,7	18	2

Tableau II — Alliages d'aluminium

État	Désignation		Composition											Caractéristiques	
	AFNOR	Courante	Al	Mg	Si	Cu	Ni	Ti	Zn	Zr	Mn	Cr	Divers	R	A
Corroyé	AG 3		Base	2,7							0,3			18	17
Corroyé	AG 4 MC		»	4,5							0,6	0,15		24	16
Corroyé	ASG		»	0,8	1			0,1			0,6			21	16
Corroyé	AU 4 G 1		»	1,5	0,4	4,4					0,6			43	10
Corroyé	AU 2 GN	RR 58	»	1,5	0,2	2,2	1,2	0,1					Fe / 1,2	41	6
Corroyé	AU 4 SG		»	0,5	0,8	4,5		0,1			0,8			46	9
Corroyé	AS 12 UN		»	1	12	1	1							36	3
Corroyé	AZ 5 GU		»	2,5		1,6		0,1	5,5			0,2		55	7
Coulé	AU 5 GT		»	0,25		4,7		0,25						28	3
Coulé	AS 2 UN	RR 50	»	0,1	2,3	1,3	1,3	0,15					Fe / 1	36	4
Coulé	AS 7 G-03		»	0,25	7									19	2
Coulé	AU 4 NT		»	1,5		4	2	0,15						17	0,5
Coulé	AU 5 NZr	RR 350	»			5	1,5	0,2		0,2	0,25		Co et Sb / 0,25	18	1

3.2. Principaux matériaux utilisés. — Afin de ne pas alourdir par trop cette présentation des matériaux utilisés en aéronautique et en astronautique, seuls les alliages d'un emploi suffisamment répandu seront cités dans les tableaux qui suivent.

Ces alliages sont présentés de la façon suivante :

— Désignation AFNOR,
— Désignation courante,
— Composition nominale (éléments constitutifs, à l'exclusion des éléments à faible concentration et des impuretés),
— Résistance à la rupture (R) et allongement de rupture (A) à la température ambiante (valeurs minimales garanties) ; R est exprimé en hectobars ; A est un pourcentage.

Les différentes classes d'alliages rencontrées dans le domaine des températures faibles et moyennes (de l'ambiante à 850 °C environ) sont les suivantes :

— Alliages de magnésium,
— Alliages d'aluminium,
— Alliages de titane,
— Alliages de fer,
— Alliages de cuivre,
— Corps composites.

1° *Alliages de magnésium* (V. tableau I).

Ce tableau, qui indique que les alliages de magnésium sont surtout utilisés à l'état coulé, permet de les classer en trois groupes principaux :

— alliages contenant de l'aluminium et une faible proportion de zinc, de résistance modeste mais économiques,
— alliages contenant du zinc et du zirconium, à résistance plus élevée,
— alliages contenant du thorium ou des terres rares, pouvant être utilisés à plus haute température que les précédents (250 à 350 °C).

Un emploi typique des alliages de magnésium est constitué par les carters coulés dont la température de fonctionnement reste faible (inférieure à 300 °C).

Ces alliages sont intéressants au point de vue caractéristiques mécaniques, mais leur sensibilité à la corrosion saline en limite de plus en plus l'emploi.

2° *Alliages d'aluminium* (V. tableau II)

Ce tableau indique que les alliages d'aluminium sont utilisés, soit coulés, soit corroyés, la résistance et surtout l'allongement des alliages coulés étant inférieurs à ceux des alliages corroyés.

Tableau III — Alliages de titane

État	Désignation		Composition							Caractéristiques	
	AFNOR	Courante	Ti	Al	V	Mo	Sn	Zr	Cu	R	A
Corroyé	T 40		Base							39	20
	TU 2	IMI 230	»						2,5	65	10
	TA 6 V		»	6	4					88	10
	TA 5 E		»	5			2			79	10
	TAD 4 E	IMI 550	»	4		4	2		Si 0,5	108	7
	TAV 6 E	662	»	6	6		2		0,6	110	6
	TA 6 Zr 5 D	IMI 685	»	6		0,5		5	Si 0,25	99	6
	TA 6 Zr 4 DE	6.2.4.2.	»	6		2	2	4		90	8

On peut faire le classement suivant :

— alliages corroyés, au magnésium, de faible résistance mais soudables,

— alliages corroyés, au cuivre-magnésium, de caractéristiques plus élevées,

— alliages de fonderie, au cuivre-magnésium,

— alliages de fonderie à hautes caractéristiques, au silicium-cuivre-nickel,

— alliages de fonderie pour fonctionnement à plus haute température (300 °C, 350 °C) au cuivre-nickel avec additions diverses.

Les alliages d'aluminium sont les matériaux de base des cellules ; ils sont largement utilisés pour les structures (AU 4 G1 et AZ 5 GU). L'alliage AU 4 SG est très employé pour les pièces de forge. Dans le cas de l'avion Concorde, c'est l'alliage AU 2 GN, meilleur en tenue à chaud, qui a été retenu comme matériau de base. Sur les turboréacteurs, les températures atteintes dans le compresseur restreignent de plus en plus l'usage des alliages légers.

3° *Alliages de titane* (V. tableau III)

Les alliages de titane utilisés pour les fabrications de série sont sous forme corroyée ; la coulée de précision ne se trouve encore qu'à l'état expérimental.

On distingue :

— le titane pur,

— les alliages à caractéristiques moyennes (TU 2, TA 5 E, TA 6 V),

— les alliages à hautes caractéristiques (TAD 4 E et TAV 6 E),

— les alliages pour résistance à chaud (entre 350 et 500 °C) (TA 6 Zr 5 D, TA 6 Zr 4 DE).

Ces alliages présentent le risque de devenir fragiles, ce qui oblige l'utilisateur à prendre de grandes précautions pendant leur mise en œuvre et en service ; en particulier, ils absorbent facilement l'hydrogène et les ions halogènes et sont très sensibles à la corrosion saline à chaud.

Leur emploi tend cependant à se généraliser à cause de l'économie de masse qu'ils apportent dans les structures des cellules et dans les compresseurs (fig. IV-4) et carters des moteurs.

D'une façon générale, c'est l'alliage TA 6 V qui est le plus utilisé pour les pièces mécaniques. Pour les pièces chaudronnées, l'alliage TU 2 est un compromis donnant des caractéristiques moyennes et une facilité satisfaisante de mise en œuvre ; l'alliage TA 5 E, offrant une meilleure résistance, doit être formé à chaud.

4° *Aciers*

Les aciers constituent un groupe extrêmement important parmi les matériaux aéronautiques.

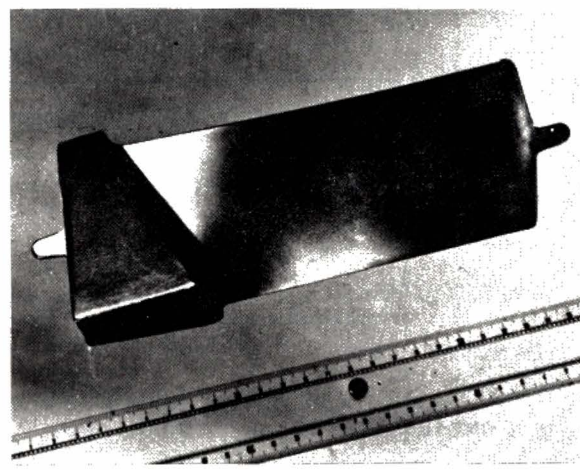


Fig. IV-4 — Aube mobile de compresseur (alliage de titane TA 6 V) (*S.N.E.C.M.A.*)

a) *Aciers faiblement alliés.* — Sur le tableau IV figurent les principaux aciers faiblement alliés avec leurs applications types.

b) *Aciers alliés.* — Les aciers alliés (au moins un élément d'addition ayant une teneur supérieure à 5 %) sont prévus pour résister à l'oxydation (teneur en chrome de 12 à 25 %). En outre, ils doivent présenter, suivant les cas, certaines propriétés particulières telles que bonne tenue en fatigue, résistance élevée à froid, résistance à température élevée. Ces propriétés sont obtenues à l'aide de différentes additions dont les plus usitées sont le nickel, le cobalt, le molybdène.

Sur le tableau V figurent un certain nombre d'aciers alliés, ainsi que des exemples d'applications (fig. IV-5).

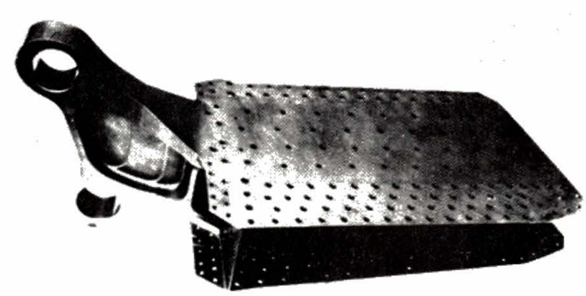


Fig. IV-5 — Ferrure d'aile de grande dimension, près de 1,3 m de longueur, forgée en acier Z 2 NKD 18 ou Maraging, à très haute résistance (180 hbar) (*S.N.E.C.M.A.*)

Tableau IV — Aciers faiblement alliés

État	Désignation		Composition							Caractéristiques		Applications types
	AFNOR	Courante	Fe	C	Cr	Ni	Mo	V	Si	R	A	
Corroyé (éventuellement coulé)	25 CD 4		Base	0,25	1		0,2			67	13	Pièces faiblement sollicitées
	30 CD 12		»	0,30	3		0,4			93	13	Pièces nitrurées
	15 CDV 6	Vascojet 90	»	0,15	1,5		0,9	0,25		98	10	Pièces de structure
	16 NCD 13		»	0,16	1	3,2	0,25			118	8	Pignons cémentés
	35 NCD 16		»	0,35	1,7	4	0,4			176	5	Trains d'atterrissage
	40 CDV 20	Vascojet 1000	»	0,40	5		1,3	0,5		172	7	Corps de fusées
	60 SC 7		»	0,60	0,8				1,5	157	7	Ressorts
	100 C 6		»	1,0	1,4					HRC $\geqslant$ 57		Roulements

Tableau V — Aciers alliés

État	Désignation		Composition									Caractéristiques		Exemples d'applications (en degrés Celsius)
	AFNOR	Courante	Fe	C	Cr	Ni	Mo	Co	V	Ti	Divers	R	A	
Corroyé	Z 12 C 13		Base	0,12	13							60	16	Aubes et disques de compresseur ($t < 500°$)
	Z 10 CKD 10	Firth Vickers 535	» »	0,10	10,5	0,7	0,8	6	0,3		Nb/0,4	103	10	Disques de compresseur et de turbine ($t < 550°$)
	Z 6 NCT 25	A 286	»	0,06	14	25	1,2		0,3	2,1		90	13	Aubes et disques de compresseur, boulonnerie ($t < 700°$)
	Z 10 CNT 18	18/8	»	0,10	18	10				0,5		49	40	Pièces peu sollicitées. Notamment enveloppes en tôles ($t < 850°$)
	Z 10 CNW 17	NS 190	»	0,10	17	12				0,6	W/3	54	35	
	Z 8 NCDT 42	Inco 901	»	0,06	12,5	42,5	5,5	< 1		2,9		114	10	Disques de compresseur et de turbine ($t < 650°$)
	Z 5 CNU 17	17/4-PH	»	0,05	16,5	4					Cu/4	131	10	Éléments en tôle soudable à hautes caractéristiques ($t < 350°$)
	Z 8 CND 15	PH15/7 Mo	»	0,08	15	7	2,5					125	6	Structures à haute résistance. Nid d'abeilles
	Z 2 NKD 18	Maraging	»	0,02		18	5	8		0,5		180	6	Pièces très fortement sollicitées : ferrures, corps de fusée

Tableau VI — Alliages de cuivre

État	Catégorie	Désignation		Composition							Caractéristiques	
		AFNOR	Courante	Cu	Sn	Zn	Ni	Al	Si	Fe	R	A
Corroyé	Bronzes	UE 9 P	92/8	Base	8						45	30
Corroyé ou coulé		UA 10 N	NC 4	»			4,5	9,5		3	68	13
		UN 3 S	NS 5	»			2,5		1		60	8
Corroyé	Laitons	UZ 40		»		40					32	18
		UZ 39 Pb 2				39				Pb/2,5	38	15

Tableau VII — Alliages de nickel

État	Désignation		Composition									Caractéristiques	
	AFNOR	Courante	Ni	C	Cr	Mo	Co	Ti	Al	Divers		R	A
Alliages corroyés	NC 20 T	Ni 75	Base	0,10	20		< 5	0,4				65	30
	NC 20 TA	Ni 80 A		0,08	20		< 2	2,2	1,4			103	20
	NCK 20 TA	Ni 93		0,10	20		18	2,4	1,3			108	20
	NK 20 CDA	Ni 105		0,15	15	5	20	1,2	4,75		$\frac{\text{B}}{0,07}$		
	NC 19 FeNb	Inco 718		0,06	19	3	< 1	0,9	0,6	$\frac{\text{Nb + Ta}}{5,25}$	Fe : 17	127	12
	NCK 20 D	C 263		0,06	20	6	20	2,2	0,5			62	12
	NC 20 K 14	Waspaloy		0,05	20	4,5	13,5	3	1,4			124	15
	NC 22 FeD	Hastelloy X		0,10	22	9	1,5			W : 0,6	Fe : 18,5	69	30
	NCK19DAT	Udimet 500		0,10	19	4	17,5	3	3			113	15
	NK18CDAT	Udimet 700		0,06	15	5	18	3,25	4,25		$\frac{\text{B}}{0,03}$	122	10
	NC 19 KDT	René 41		0,10	19	10	11	3	1,6			117	8
	N (ThO$_2$) 2	TD Nickel		0,02							ThO$_2$: 2	39	15
Alliages coulés (1)	NC 20 Nb	PE 10		0,02	20	6				$\frac{\text{Nb + Ta}}{6,5}$	W : 2,5	65	8
	NC 13 AD	Inco 713		0,14	13	4,5	< 1	0,75	6	$\frac{\text{Nb + Ta}}{2,3}$	$\frac{\text{Zr}}{0,10}$	76	3
	NK 15 CAT	IN 100		0,17	9,5	3	15	4,75	5,5	V : 1	$\frac{\text{Zr}}{0,06}$	79	5
	NC 22 DK	C 242		0,30	21,5	10,5	10	0,3	0,2				
	NW 11 AC	PD 16		0,13	6	2	< 1,5	0,5	6	Nb : 1,5	W : 11 $\frac{\text{Zr}}{0,13}$ $\frac{\text{B}}{0,02}$		

(1) Pour les alliages de nickel on utilise une des méthodes appartenant à la technique dite « coulée de précision » qui permet d'obtenir des pièces à des cotes très proches des cotes finies.

Tableau VIII — Alliages de cobalt

État	Désignation		Composition							Caractéristiques	
	AFNOR	Courante	Co	C	Cr	Fe	Ni	W	Divers	R	A
Alliage corroyé	KC 20 WN	HS 25	Base	0,10	20	< 3	10	15		85	30
Alliage coulé	KC 25 NW	HS 31	»	0,50	26	< 2	10,5	7,5		60	10
	KC 22 W Ta	MAR. M-302	»	0,85	22			10	Ta : 9	86	1
	KC 15 Ta	Co-Cr-TaC Eutectique orienté	»		15				TaC : 13		

5° *Alliages de cuivre* (V. tableau VI)

Les alliages de cuivre ne sont utilisés dans l'aéronautique et l'espace que pour des emplois bien particuliers, tels que la résistance au frottement.

Ce sont :

— les bronzes à l'étain,
— les crupro-nickels et cupro-aluminiums,
— les laitons (additions de zinc).

Les cages de roulement, en particulier, sont fréquemment en UA 10 N ou UN 3 S.

4. MATÉRIAUX POUR FONCTIONNEMENT À HAUTES TEMPÉRATURES ET PENDANT DE LONGUES DURÉES (parties chaudes des moteurs d'avion)

4.1. Propriétés diverses exigées. — Dans ce cas, les aciers, même à forte teneur en éléments alliés (augmen-

tation de la résistance à la chaleur), ne suffisent plus et on doit abandonner les alliages à base de fer pour des alliages à base de nickel ou de cobalt.

Ces derniers alliages contiennent d'ailleurs généralement une proportion plus ou moins importante :

— de chrome pour améliorer leur tenue à l'oxydation à chaud,

— d'éléments durcissants (aluminium, titane) pour améliorer leur résistance au fluage.

Le domaine normal d'utilisation de ces alliages à base de nickel ou de cobalt se situe dans la zone de température de 600 à 1 100 °C, ce gain de 300 °C étant obtenu cette fois-ci, non pas au détriment de la masse (masse volumique du fer 7,8 g/cm^3, du nickel 8,9 g/cm^3, du cobalt 8,6 g/cm^3), mais au détriment du prix de la matière approvisionnée et de sa mise en œuvre.

Cependant, si l'on désire faire fonctionner des pièces de moteurs à plus haute température, et c'est bien le cas actuellement pour les moteurs dits « avancés », il faudra avoir recours à d'autres alliages, tels que ceux à base de niobium, qui permettront d'atteindre 1 300 °C, moyennant toutefois une protection efficace contre l'oxydation. Toutefois, on peut signaler que grâce aux techniques de refroidissement, on peut déjà admettre 1 250 °C en amont des turbines.

C'est ce difficile problème de la protection qui constitue, avec le prix, les obstacles majeurs à l'utilisation en service des alliages de niobium.

Les températures acceptables pour les pièces en service, en fonction des contraintes, peuvent être déduites des graphiques représentés par les figures IV-6 et IV-7. La température est portée en abscisse et on lit en ordonnée le rapport $\frac{\text{contrainte}}{\text{densité}}$, la contrainte étant celle qui produit, dans l'alliage considéré, un allongement de 0,2 % après maintien pendant 300 heures. La densité considérée est la densité par rapport à l'eau (rappelons que ce nombre est égal au rapport de la masse volumique du corps et de la masse volumique de l'eau à 4 °C). Le graphique de la figure IV-6 montre comment, dans la zone de 600 °C, les alliages à base de nickel prennent le relais des aciers et alliages à base de titane.

Le graphique de la figure IV-7 montre qu'au-delà de 1 000 °C, il faut faire appel aux matériaux tels qu'alliages à base de niobium, composite cobalt-chrome-carbure de tantale ou alliage de nickel renforcé par de l'oxyde de thorium en phase dispersée.

4.2. Principaux alliages retenus. — Les tableaux ci-après regroupent les principales nuances en :

— alliages de nickel

— alliages de cobalt

— alliages de niobium.

1° *Alliages de nickel* (V. tableau VII)

On remarque que certains de ces alliages sont utilisés à l'état corroyé, et d'autres à l'état coulé ; ces derniers ayant naturellement une capacité d'allongement nettement plus faible.

Les alliages corroyés contiennent tous une forte proportion de chrome (15 à 22 %) assurant la résistance à l'oxydation ; ils contiennent, en outre, une proportion variable de cobalt augmentant la résistance à chaud.

Pour les alliages coulés, une teneur en chrome plus faible peut être associée à une teneur élevée en cobalt ou en tungstène.

On peut citer, comme exemples d'utilisation de ces alliages :

— pour le NC 20 K 14 corroyé : disques de compresseurs et de turbine, carters,

— pour le NCK 20 D, corroyé ou coulé : anneaux porte-brûleurs, chambres de postcombustion,

— pour le NCK 19 DAT et le NK 18 CDAT corroyés : aubes mobiles de turbine (fig. IV-8),

— pour le NC 22 FeD en tôles : chambres de combustion, chambres de postcombustion (fig. IV-9),

— pour le NK 15 CAT et le NC 13 AD coulés : aubes mobiles de turbine (ou aubes fixes),

— pour le NW 11 AC : aubes fixes de turbine.

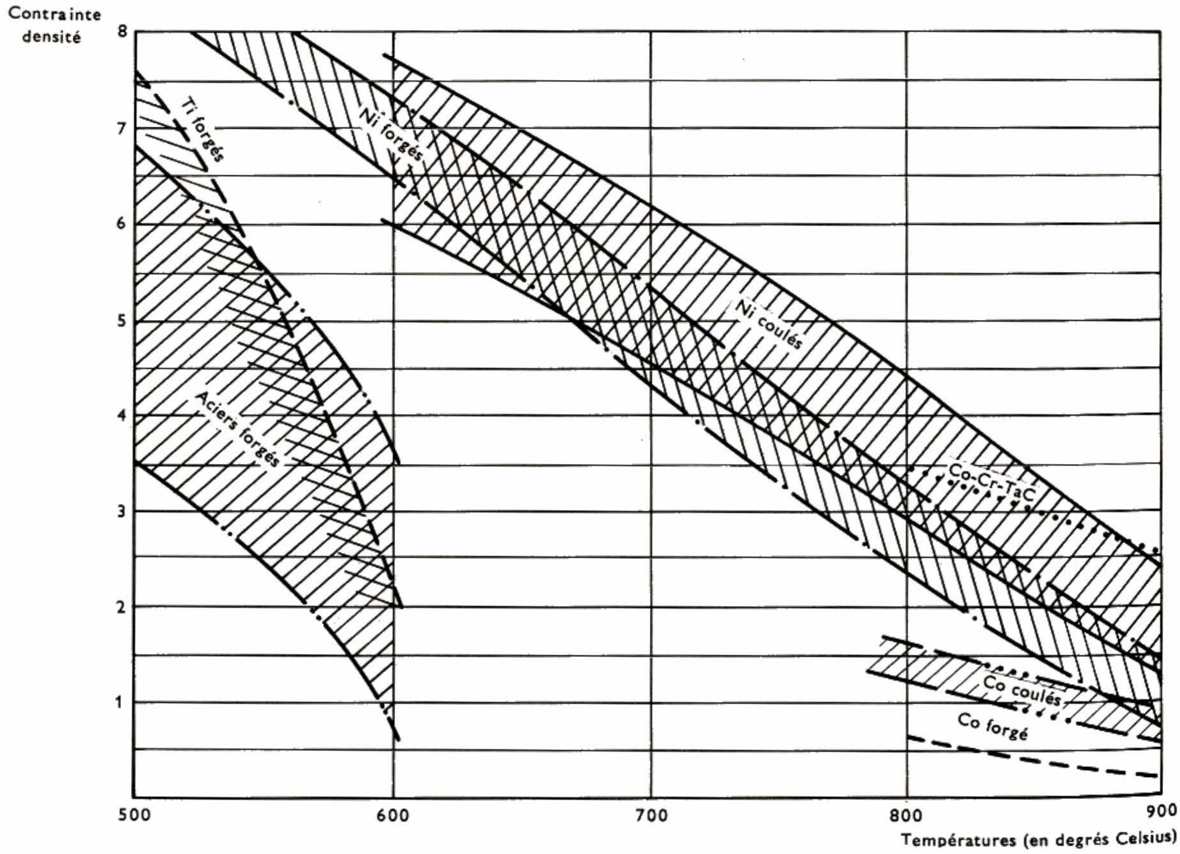


Fig. IV-6 — La contrainte considérée est celle qui produit un allongement de 0,2 % après maintien pendant 300 h

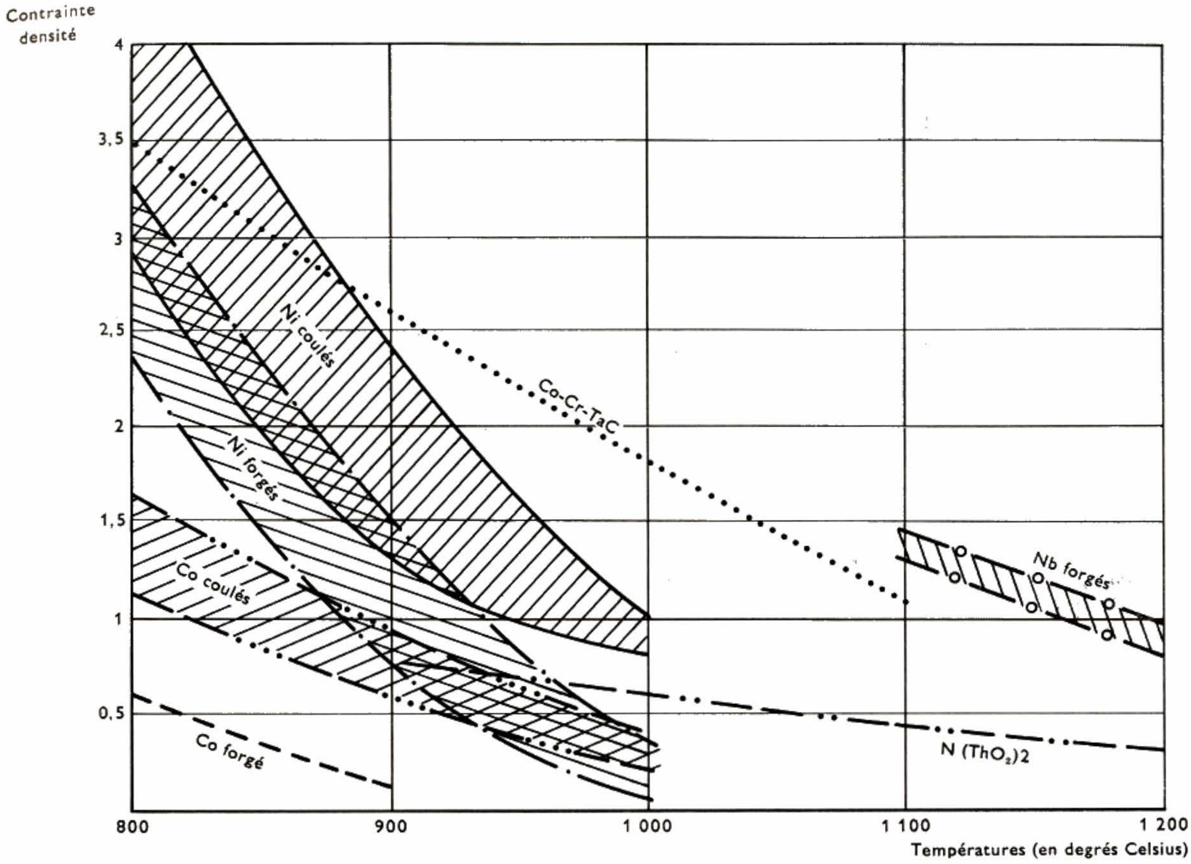


Fig. IV-7 — Courbes de fluage spécifique (contrainte sur densité) d'allongement 0,2 % en 300 h de 800 à 1 200 °C



Fig. IV-8 — Aube mobile de turbine forgée en alliage NK 18 CDAT ou Udimat 700 (*S.N.E.C.M.A.*)

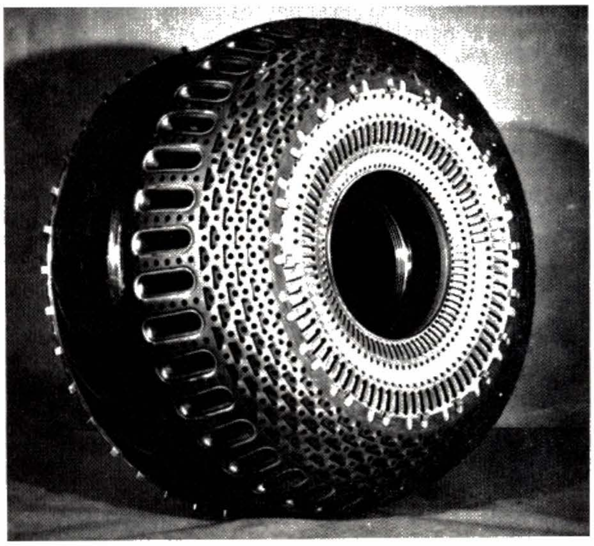


Fig. IV-9 — Ensemble chambre de combustion-distributeur de turbine. La chambre est en alliage de nickel NC 22 FeD (*S.N.E.C.M.A.*)

2° *Alliages de cobalt* (V. tableau VIII)

Peu d'alliages à base de cobalt ont été indiqués dans ce tableau. Ces alliages, en effet, ne sont pas encore d'un emploi très répandu.

Cependant, plusieurs nuances, dérivées ou non de celles indiquées, sont en utilisation expérimentale et il est à penser que, dans quelques années, la liste de tels alliages sera beaucoup plus longue.

Présentant, par rapport aux alliages de nickel, une meilleure tenue à la fatigue thermique et une résistance à chaud compétitive pour les hautes températures (à partir de 900 °C environ), les alliages de cobalt sont retenus pour les aubes fixes de turbine et pour les carters en tôle situés à la partie arrière des réacteurs (canal d'éjection).

Sur la figure IV-10, on voit une chemise de protection thermique fabriquée à partir d'une tôle mince en alliage de cobalt.

Le dernier matériau indiqué dans le tableau VIII est un composite constitué de fils de carbure de tantale dont la matrice à base de cobalt et de chrome est obtenue par solidification orientée. Il permet une augmentation de température de 70 °C environ par rapport à l'alliage de nickel NK 15 CAT.

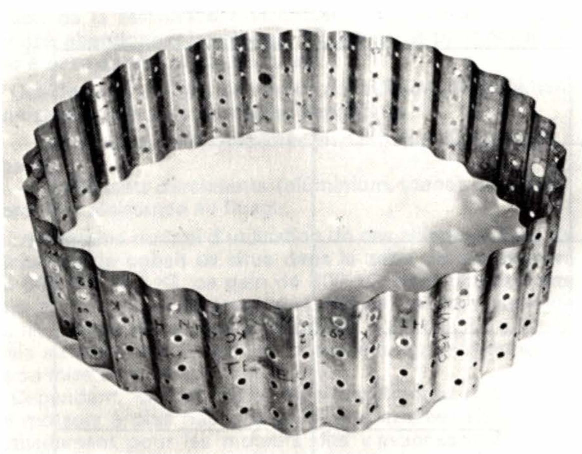


Fig. IV-10 — Chemise de protection thermique en alliage de cobalt KC 20 WN (HS 25) (*S.N.E.C.M.A.*)

3° *Alliages de niobium* (V. tableau IX)

Ce sont des alliages expérimentaux ; ils ne sont pas produits industriellement de façon courante.

Lorsque les problèmes techniques (protection, tenue aux impacts et aux chocs thermiques) et de prix auront été réglés pour ces alliages, des emplois ne manqueront pas de se trouver pour toutes pièces fonctionnant à très haute température telles que chambres de combustion, ou de postcombustion, et aubes de turbines fixes des réacteurs des futures générations.

5. MATÉRIAUX POUR UN FONCTIONNEMENT À TEMPÉRATURE TRÈS ÉLEVÉE MAIS DE COURTE DURÉE

5.1. Propriétés diverses exigées. — Dans le cas présent, la caractéristique essentielle demandée aux matériaux n'est plus la limitation de sa déformation ou de sa détérioration dans le temps, mais une « durée de vie » minimale, c'est-à-dire que l'on exige du matériau qu'il soit susceptible de remplir son office pendant une durée prescrite, une destruction partielle pouvant néanmoins être admise.

Les températures peuvent dépasser 3 000 °C mais la durée de vie exigée est alors de quelques dizaines, ou quelques centaines de secondes.

Les propriétés du matériau sont essentiellement les suivantes :

a) *Propriétés intrinsèques*

— point de fusion ou de sublimation suffisamment élevé,
— résistance à l'érosion à chaud.

b) *Mise en œuvre*

— aptitude au dépôt en couche protectrice sur le support prévu.

Le premier matériau employé dans la fabrication de la tuyère d'un moteur-fusée a été le graphite (température de sublimation voisine de 3 650 °C), puis on a eu recours à des oxydes, comme celui du zirconium et, plus tard, à des composés mixtes de céramique et de métaux, désignés sous le vocable de cermets.

Malgré tout, les puissances demandées aux fusées étant sans cesse croissantes, la réaction de combustion entraînera des températures de plus en plus élevées (4 000 °C et plus). La tenue des matériaux en contact avec les gaz d'échappement portés à ces températures peut alors être obtenue par l'utilisation d'une paroi poreuse au travers de laquelle sera injecté un gaz de refroidissement. On a réalisé, par exemple, des tuyères en fibre de verre imprégnée de résine et recouverte intérieurement d'une couche de métal poreux.

Un cas particulier de fonctionnement à très haute température, mais pour des durées plus grandes que la durée de vie d'un moteur-fusée, est celui de la rentrée dans l'atmosphère terrestre des véhicules interplanétaires. Il faut éviter que l'énorme quantité de chaleur, dégagée par le frottement des parois du véhicule sur les couches de l'atmosphère, soit transmise à la structure de ce véhicule qui se consumerait alors à la manière d'une étoile filante. Ce problème a été résolu en revêtant le véhicule d'un matériau de protection destiné à se volatiliser en absorbant ainsi la chaleur dégagée par le frottement. C'est la technique du matériau d'ablation qui fut d'abord un composé de graphite et de résine et, par la suite, un composé organique (résines phénoliques armées, plastiques tels que le téflon, etc.).

5.2. Principaux matériaux retenus. — Pour résoudre les problèmes cités ci-dessus, on a recours aux différentes classes de matériaux suivantes :

— composites à base d'oxyde (de silicium, de zirconium),
— cermets,
— émaux,
— tissus divers (carbonisés, à base d'amiante),
— silicones,
— résines phénoliques armées,
— résines polyuréthannes armées.

6. MATÉRIAUX COMPOSITES STRUCTURAUX

1.6.1. Définitions. — On désigne sous le nom de composites des corps constitués de plusieurs matériaux de natures différentes et ayant chacun une fonction bien déterminée.

Le type de composite employé dans l'industrie aéronautique et spatiale comprend une matrice dans laquelle sont enrobées des fibres. La contrainte appliquée est essentiellement supportée par les fibres, la matrice leur servant de support de protection et transmettant les contraintes d'une fibre à l'autre.

Cette technique permet l'utilisation de matériaux de faible masse volumique, offrant une très grande résistance du fait que leur très faible volume entraîne une réduction des macrodéfauts qui limitent cette résistance dans les produits de dimensions courantes.

La liaison fibre-matrice doit être prévue pour transmettre les contraintes de cisaillement ; néanmoins elle doit présenter une ductilité suffisante pour permettre une bonne tenue du composite aux chocs. Un mouillage satisfaisant entre fibre et matrice est donc indispensable.

Tableau IX — Alliages de niobium

État	Désignation		Composition								Caractéristiques	
	AFNOR	Courante	Nb	C	W	V	Mo	Ti	Zr	Hf	R	A
Corroyé	NbW 10 V	P 353 M	base	0,3	10	5		3	3		73	19
	NbW 6HfZr	W 6	»	0,2	6				2	2	45	15
	NbW 9 DHf	WD 15	»	0,2	9,5		5			3,5	75	10
	NbW 20 Zr	AS 30	»		20				1			

Tableau X — Composites à fibres de verre

Matériau	Densité	Caractéristiques (hectobars)		
		Résistance	R/d (1)	Module d'élasticité
Fibres de verre *E*	2,54	340	136	7 250
Composite unidirectionnel 60 % de fibre en volume (essai NOL)	2,0	140	70	
Fibres de verre *R*	2,50	440	176	7 500
Composite unidirectionnel 60 % de fibre en volume (essai NOL)	2,0	165	83	

(1) *d*: densité du corps par rapport à l'eau. V. § 1.4.1.

Tableau XI — Composites à fibres de carbone

Matériau	Variété	Densité	Caractéristiques (hectobars)		
			R	R/d	Module d'élasticité
Fibre de carbone	Haut module	1,95	180	92	35 à 45 000 (traction)
	Haute résistance	1,75	280	143	25 à 30 000
Composite unidirectionnel (60 % de fibre en volume)	Haut module	1,65	80	48	18 500 (flexion)
	Haute résistance	1,55	140	90	13 500 (flexion)

6.2. Types de matériaux. — Les matériaux pour fibres sur lesquels ont porté les expérimentations actuelles sont principalement le verre, le carbone et le bore.

Les matrices organiques sont en général :

— Les résines époxydes faciles à mettre en œuvre et polymérisées sous faible pression, mais limitées à des températures d'emploi de 150 à 180 °C en longue durée.

— Les résines polyimides nécessitant une polymérisation sous forte pression mais pouvant être utilisées jusqu'à 150 à 280 °C.

Les fibres sont disposés parallèlement dans la matrice-support pour constituer des rubans ou des tissus. Les pièces sont réalisées par empilage de couches de rubans (ou de tissus) et polymérisation, avec un croisement des couches successives ; ce croisement est fonction des rapports de caractéristiques souhaitées entre long et travers.

1° *Composites à base de fibres de verre.* — Les composites de fibres de verre et de résine organique sont utilisés industriellement en aéronautique. Il s'agit de matériaux à base de fibres continues en verre *E* pour des pièces courantes, en verre *R*, d'un prix plus élevé, pour des pièces nécessitant une résistance supérieure. Les verres sont à base de silice et contiennent divers oxydes (de calcium, d'aluminium, de magnésium, de bore, etc.).

Les caractéristiques à température ambiante sont résumées dans le tableau X ci-dessus.

Ce type de matériau est, en général, utilisé pour des pièces assez peu sollicitées ; cependant, des applications telles que pales d'hélicoptère ou corps de propulseur bobinés d'engins, correspondent à des conditions sévères d'utilisation.

2° *Composites à base de fibres de carbone.* — La fibre de verre offre l'inconvénient d'un module d'élasticité relativement faible. Des fibres de carbone obtenues par pyrolisation de fibres textiles synthétiques donnent à la fois une résistance élevée et un haut module d'élasticité. Ce type de matériau, utilisé avec des matrices organiques analogues à celles employées pour les composites à base de fibres de verre, est actuellement en développement. Si les performances indiquées dans le tableau XI sont très attrayantes, les prix sont actuellement très élevés.

Les applications étudiées correspondent à des pièces de structure d'avions, des carters de réacteur, etc.

3° *Composites à base de fils de bore.* — Des fils de bore de diamètre voisin de 0,1 mm, atteignent aussi des caractéristiques élevées en résistance et module d'élasticité. Ces fils sont obtenus par décomposition d'un halogénure, en phase vapeur, préalablement déposé sur un fil fin de tungstène chauffé à haute température.

Les caractéristiques du fil seul et des composites à matrice organique sont données dans le tableau XII. Les applications, en cours d'étude, sont aussi des pièces de structure, des frettages de pièces tournant à grande vitesse, etc. Les performances intéressantes de ce type de matériau se paient malheureusement un prix élevé.

Des études de composites à base de fils de bore avec matrice en alliage léger sont avancées. Des bandes de composite sont obtenues par projection de la matrice en alliage léger sur des monocouches de fils parallèles, lesquelles sont empilées ensuite et frittées vers 550-600 °C, sous vide. La projection est réalisée à l'aide d'un chalumeau à plasma. Les caractéristiques obtenues sont données dans le tableau XIII. Ce type de composite est utilisable jusque vers 300 °C.

Il est à signaler que lors des frittages à l'état solide (ou liquide), ou des utilisations de pièces pendant de longues durées à haute température, il y a un risque de réaction entre le fil de bore et la matrice en alliage léger ; dans ces cas on utilise un fil de bore revêtu d'une couche protectrice telle qu'un mince dépôt de carbure de silicium obtenu en phase vapeur.

Le développement de ces composites à matrice métallique, très coûteux, est moins avancé que celui des composites à matrice organique ; l'intérêt principal est la possibilité de travailler à des températures relativement élevées (450 à 500 °C).

Tableau XII — Composites à fils de bore et matrice organique

Matériau	Densité	Caractéristiques (hectobars)		
		Résistance	R/d	Module d'élasticité
Fil de bore	2,63	330	125	40 000 (traction)
Composite unidirectionnel (60 % de fil en volume)	2,00	190	95	21 000 (flexion)

Tableau XIII — Composite à fils de bore et matrice en alliage léger

Matériau	Densité	Caractéristiques (hectobars)		
		Résistance	R/d	Module d'élasticité
Composite unidirectionnel (60 % de fil en volume)	2,65	150	57	23 500 (flexion)

Tableau XIV — Composites à fils de bore revêtu de carbure de silicium et matrice en alliage léger

Matériau	Densité	Température d'essai	Caractéristiques (hbar)	
			Résistance	R/d
Composite unidirectionnel (60 % de fil en volume)	2,7	20 °C	110	41
	2,7	500 °C	60	22

Les caractéristiques obtenues sur ces derniers composites sont données dans le tableau XIV.

Conclusions. — Le nombre élevé et l'extrême diversité des problèmes à résoudre par l'industrie de l'aéronautique et de l'espace, ont nécessité le recours à une gamme très large de matériaux.

Depuis le cas du train d'atterrissage qui exige un acier à très hautes caractéristiques et non susceptible de devenir fragile par maintien aux basses températures dans les couches élevées de l'atmosphère, jusqu'au matériau d'ablation protégeant la cabine des véhicules interplanétaires au moment de la rentrée dans l'atmosphère terrestre, les matières utilisées constituent une liste trop longue pour pouvoir être citées au complet.

Cette liste est d'ailleurs en évolution permanente du fait qu'elle doit satisfaire les demandes d'une technique en développement rapide.

Il n'en reste pas moins vrai, qu'à l'heure actuelle, les matériaux dont l'emploi est le plus généralisé sont les alliages légers, les aciers et, de façon croissante, les alliages de titane pour les températures faibles et moyennes.

Pour les hautes températures, au-delà des alliages à base de nickel et de cobalt, les alliages de niobium offrent beaucoup d'intérêt au point de vue caractéristiques mécaniques mais il faut encore trouver des protections fiables pour que leur développement puisse réellement démarrer.

Les composites à base de fibres de verre et à matrice organique prennent cependant une place grandissante sur le marché dans le domaine des températures modérées; les composites à base de fibres de carbone, ou de fils de bore, sont encore au stade expérimental mais doivent se répandre progressivement vers 1975-1980.

MATÉRIELS AÉROSPATIAUX

CHAPITRE V

L'AVION

1. MORPHOLOGIE DE L'AVION CLASSIQUE

1.1. Introduction. — Il nous a paru intéressant, au début de ce chapitre consacré aux différents types d'avion, d'indiquer sommairement quels sont leurs caractères communs, indépendants de l'utilisation.

Cette introduction tente de donner un aperçu de la réponse, fort complexe, qui peut être faite à la question : comment dessine-t-on un avion ? Quelles règles président à l'exécution de la première ébauche, du premier avant-projet, celui à partir duquel les bureaux d'études travailleront, jusqu'à le transformer souvent de manière très importante, compte tenu des règles de l'art, des calculs aérodynamiques, des performances et des soucis des utilisateurs ?

La grande majorité des avions actuels comportent une aile monoplane supportant un fuselage à l'arrière duquel sont placés un plan horizontal et un plan vertical comportant des gouvernes de profondeur et de direction. Nous appellerons avion classique un avion répondant à cette description. Nous excluons donc les avions *canard* (empennage en avant de l'aile), les biplans et d'une manière générale les avions sans empennage. Nous ne dirons que quelques mots en passant de la physionomie générale des avions delta sans empennage analogues aux *Mirage* ou à *Concorde*.

Les proportions des avions classiques résultent d'une expérience d'une cinquantaine d'années. Elles sont maintenant fixées, dans des limites assez étroites, qu'une statistique des formes des avions volant actuellement permet de déterminer.

Une telle étude a été entreprise il y a quelques années au *Centre d'essais en vol de Brétigny* (dans cette étude, c'est le nombre de types d'avion qui est pris en considération indépendamment du nombre d'avions construits selon un type déterminé.)

L'analyse des résultats de cette statistique demanderait un long développement. Nous porterons notre attention sur les quelques points suivants :

— masse et charge au mètre carré ;
— puissance ou poussée ;
— forme générale de l'aile ;
— fuselage et empennages ;
— gouvernes.

1.2. Masse et charge au mètre carré. — La charge au mètre carré s'obtient en divisant la masse m de l'avion par la surface des ailes S. La figure V-1 indique que la charge de l'avion par mètre carré de surface portante augmente en moyenne avec la masse totale au décollage de l'avion : ainsi un avion de 2 tonnes est chargé à 120 kg/m² et un avion de 130 tonnes à 500 kg/m².

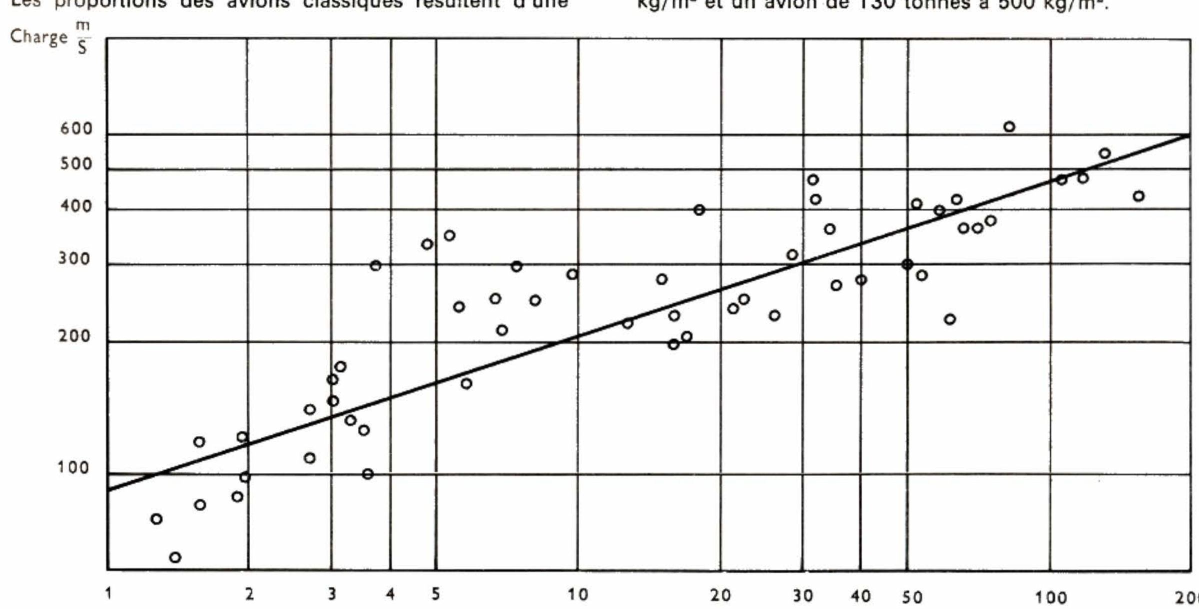


Fig. V-1 — Ordonnées : charge par mètre carré (kilogrammes par mètre carré). Abscisses : masse au décollage (tonnes)

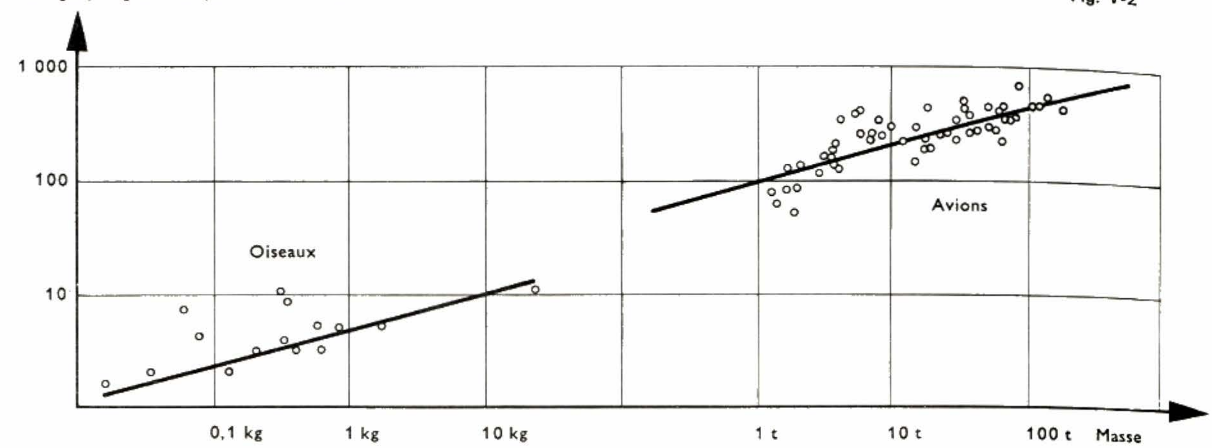


Fig. V-2

Ce résultat n'est pas surprenant. La masse m d'un avion croît comme le cube de ses dimensions linéaires, soit en prenant l'envergure b comme dimension caractéristique :

$$m = k\,b^3 \qquad k = \text{Cte} \qquad (1)$$

La surface des ailes croît comme le carré de l'envergure b pour des ailes de même forme ; λ étant une constante nous avons donc :

$$S = \frac{b^2}{\lambda} \qquad (2)$$

La charge au mètre carré est donc :

$$\frac{m}{S} = k\lambda b \qquad (3)$$

Si nous éliminons b entre la relation (1) et (2) puis entre (1) et (3), nous obtenons :

$$S = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{m}{k}\right)^{\frac{2}{3}} \qquad (4)$$

d'où :

$$\frac{m}{S} = \lambda\, k^{2/3}\, m^{1/3} \qquad (5)$$

Les deux relations (4) et (5) sont représentées par des droites sur des diagrammes logarithmiques ; celui de la figure V-1 correspond à la relation (5).

Ces résultats simples avaient déjà été obtenus par le physicien Helmholtz avant qu'aucun avion ne vole. Il est intéressant de constater que ses vues étaient justes ; la dispersion des points expérimentaux sur la figure V-1 ne peut provenir que des constantes k et λ ; k dépend à la fois de la forme géométrique de l'avion et de sa masse volumique moyenne ; λ n'est autre que l'allongement géométrique de l'aile (V. chap. 1 § 4).

Il est assez curieux de constater que les oiseaux obéissent aussi à la *loi de Helmholtz* ainsi que le montre la figure V-2 avec des valeurs moyennes des coefficients k et λ assez voisines de celles obtenues avec les avions.

L'augmentation de la charge au mètre carré avec la masse totale de l'avion au décollage se répercute sur la vitesse minimale de vol ; par exemple, si la vitesse minimale d'un avion de 10 tonnes est de 120 km/h, celle d'un avion plus grand mais de forme identique et pesant 100 tonnes serait de 180 km/h. Les longueurs de piste nécessaires à l'envol croissent comme le carré de cette vitesse, donc comme la puissance 1/3 de la masse.

De plus, la charge utile, exprimée en pourcentage de la masse totale de l'avion, diminue d'une manière assez sensible lorsque la masse de l'avion augmente ; cette diminution dépend d'une manière étroite de la conception de l'avion en fonction de son utilisation (en général, la recherche d'un long rayon d'action entraîne le conception d'un avion de masse importante). La figure V-3 donne comme exemple la charge utile d'avions commerciaux modernes de transport de passagers.

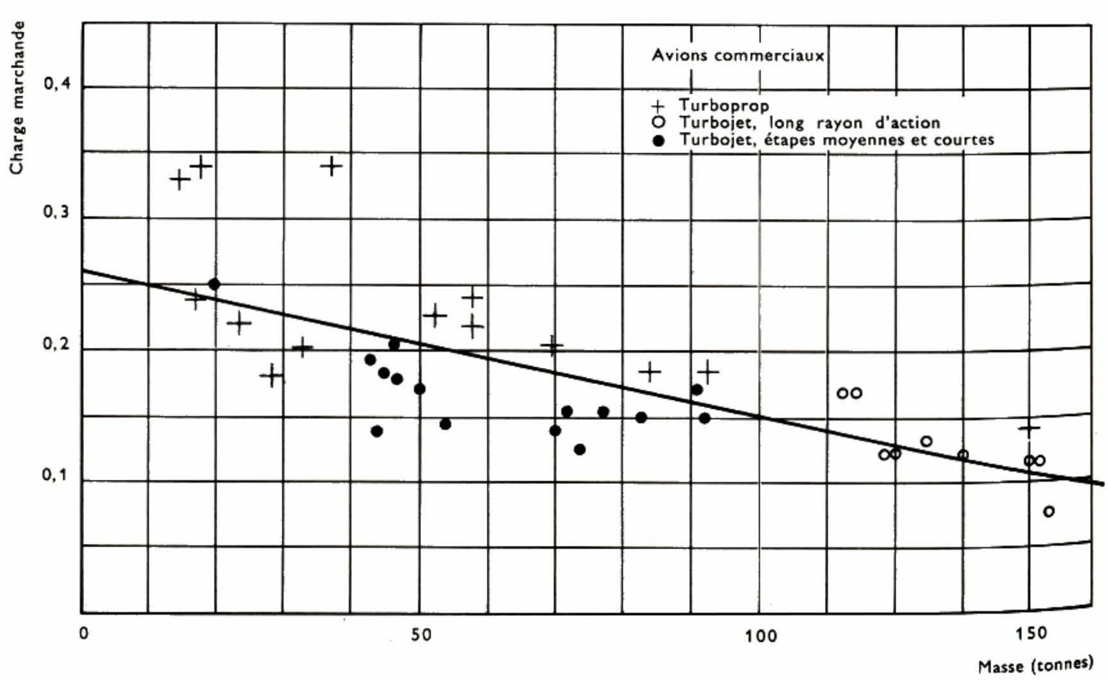


Fig. V-3

Variation de la charge marchande (exprimée en pourcentage de la masse totale de l'avion) en fonction de cette masse totale

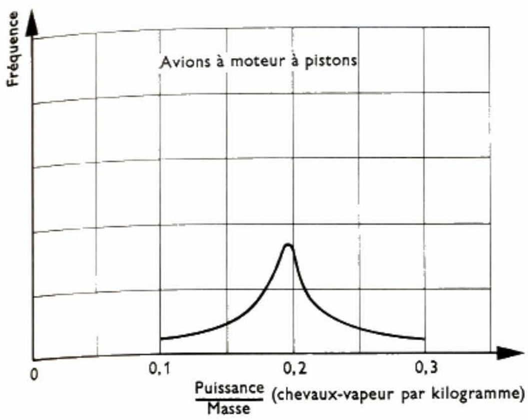


Fig. V-4

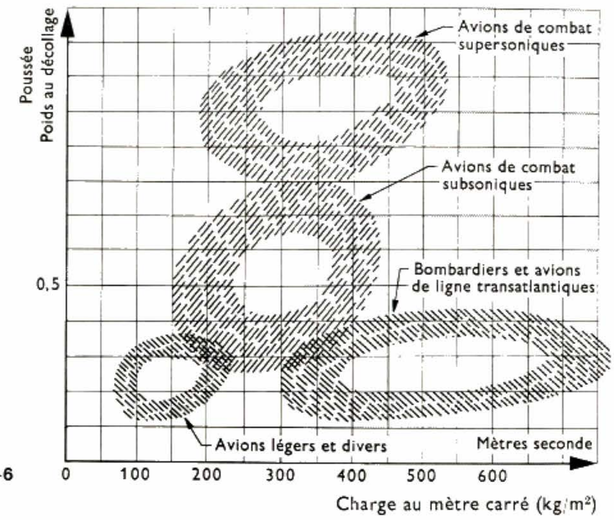


Fig. V-6

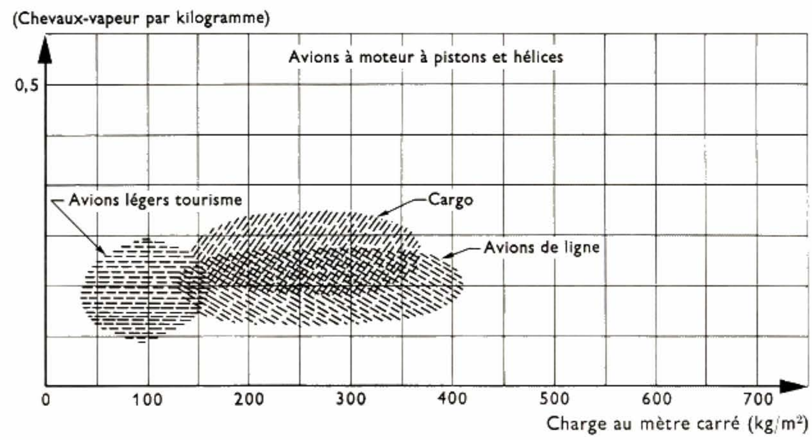


Fig. V-5

1.3. Puissance. Poussée. — La figure V-4 nous donne la fréquence des diverses puissances spécifiques de décollage (puissance rapportée à la masse ou puissance massique). Il s'agit des avions à moteurs à pistons, pour lesquels la valeur de 0,19 (valeur exprimée en chevaux-vapeur par kilogramme) est la plus fréquente (soit sensiblement 140 W/kg).

Une analyse plus précise de cette puissance massique conduit à la figure V-5 où nous avons essayé d'indiquer les valeurs approximatives de la puissance massique pour diverses catégories d'avions.

Il faut bien convenir que les différences ne sont pas très grandes d'une catégorie à l'autre. Notons que les avions de combat à moteur à pistons ont pratiquement disparu à l'époque actuelle ; les chasseurs de la guerre 1939-1945 étaient caractérisés par des puissances massiques plus grandes :

— Messerschmitt 109 G ..... 0,48 ch/kg (352 W/kg)
— Spitfire XXII .... 0,40 ch/kg (443 W/kg)
— Thunderbolt P 47 D ...... 0,38 ch/kg (278 W/kg)

Au contraire des avions à moteurs à pistons, ceux à turboréacteurs présentent de grandes différences dans le rapport de la poussée maximale au poids (poussée spécifique). La figure V-6 permet de reconnaître trois valeurs fréquentes :

— avions de transport et bombardiers 0,25
— avions de combat subsoniques 0,50
— avions de combat supersoniques............ 1,0

Les progrès réalisés dans le dessin des formes, notamment la suppression de l'empennage, ont entraîné une réduction de la résistance aérodynamique au point de permettre des poussées spécifiques comprises entre 0,3 et 0,5 pour la nouvelle génération d'avions de transport supersonique à *Mach* 2 dont *Concorde* est le premier exemple.

1.4. Forme de l'aile. — Cette forme est caractérisée par :

— l'allongement λ (fig. V-7 a). Pour une aile rectangulaire, l'allongement est le rapport de la longueur à la largeur (corde de l'aile) du rectangle. Pour une aile quelconque l'allongement est défini comme le rapport $\frac{b^2}{S}$ du carré de l'envergure b à la surface S de l'aile ;

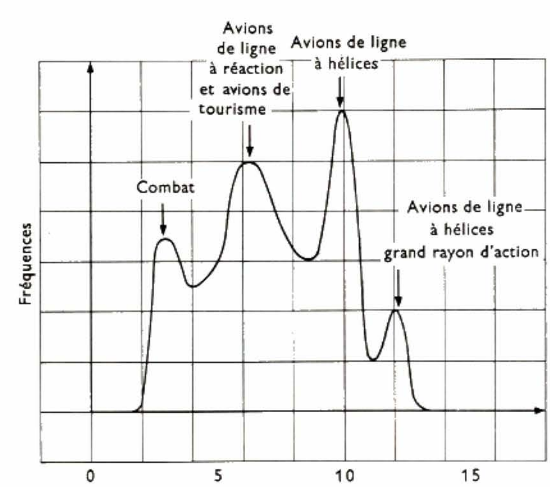


Fig. V-7 a

— la flèche φ (fig. V-7 a), angle du bord d'attaque de l'aile avec la perpendiculaire au plan de symétrie de l'aile (une aile rectangulaire a une flèche nulle) ;

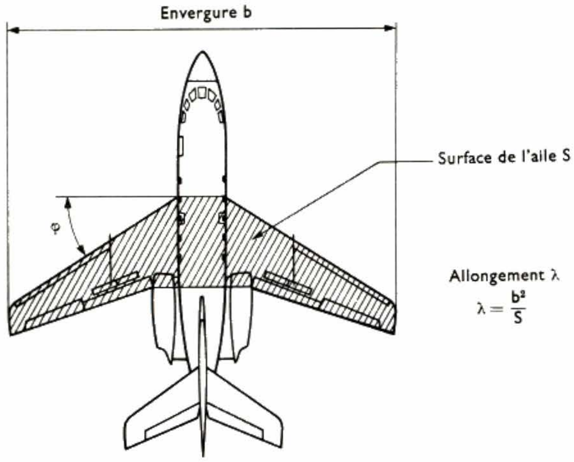
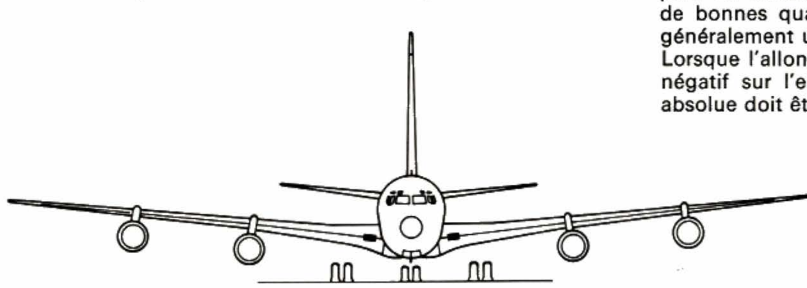


Fig. V-7 b — Forme de l'aile : allongement

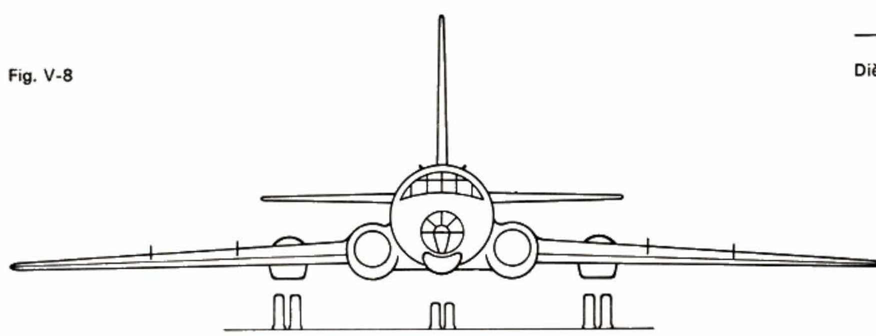


Dièdre positif (Boeing 707 320 C)



Dièdre nul (Mystère 20)

Fig. V-8



Dièdre négatif (Tupolev 104)

— le dièdre δ, angle de chaque demi-aile avec la perpendiculaire au plan de symétrie de l'aile (une aile sensiblement plane a un dièdre nul).

● L'étude statistique fait apparaître trois types d'allongements les plus fréquents (V. fig. V-7 b) :

— allongement 3 pour les avions de combat, dont l'aile doit être très solide, donc courte, rigide et peu affectée par le transsonique (un faible allongement est favorable aux caractéristiques transsoniques) ;

— allongement 6 ou 7 pour les avions de tourisme et divers, destinés à des étapes courtes ou moyennes, ainsi que pour les avions de transport à réaction subsoniques ;

— allongement 10 ou 12 pour les avions de ligne à hélices transocéaniques.

En effet, l'allongement n'est favorable à la diminution de la résistance aérodynamique globale que tant que les effets de compressibilité de l'air ne se manifestent pas. Aux nombres de *Mach* voisins de 0,8, auxquels volent les avions de ligne à réaction subsonique, la résistance due à l'approche de la vitesse sonique joue un rôle plus important que celle due aux faibles allongements.

D'une manière plus précise, l'allongement réduit cette part de la résistance aérodynamique globale qu'on appelle la *traînée induite par la portance* ou plus simplement « traînée induite ». La traînée induite est, toutes choses égales par ailleurs, proportionnelle au carré de la portance.

● Trois flèches sont principalement utilisées (fig. V-8 et V-8 bis) :

— flèche nulle (avion lent à aile droite) ;

— flèche 35° (avions subsoniques à réaction) ;

— flèche 60° (avions supersoniques).

La flèche apparaît comme le moyen essentiel de réduire cette part de la résistance aérodynamique globale qu'on appelle la *traînée d'onde*. La traînée d'onde naît quand l'avion vole au voisinage ou au-delà de la vitesse du son (V. chap. 1 § 4.2).

● Pour la flèche nulle des avions lents le dièdre est généralement le suivant :

— dièdre nul pour les avions à ailes hautes,

— dièdre 6° pour les avions à ailes basses.

L'effet aérodynamique de la flèche est, à basse altitude équivalent à celui du dièdre (en vol dérapé vers la droite, c'est-à-dire quand le vecteur vitesse de l'avion est à droite de son plan de symétrie, l'aile droite bascule vers le haut pour un dièdre positif ou une flèche positive). Pour avoir de bonnes qualités de vol, les avions à forte flèche ont généralement un dièdre nul ou légèrement négatif (1 à 2°). Lorsque l'allongement est petit on peut reporter ce dièdre négatif sur l'empennage lui-même, mais alors sa valeur absolue doit être plus grande.

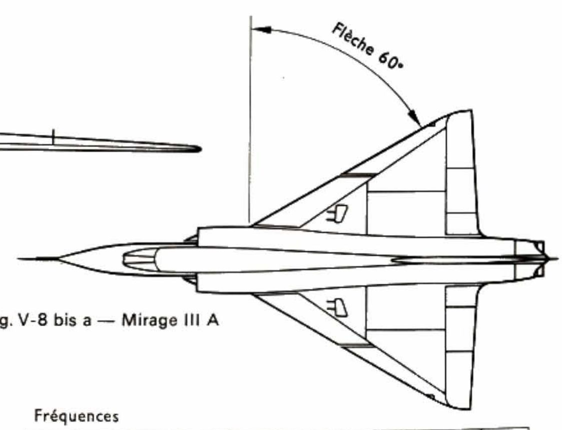


Fig. V-8 bis a — Mirage III A

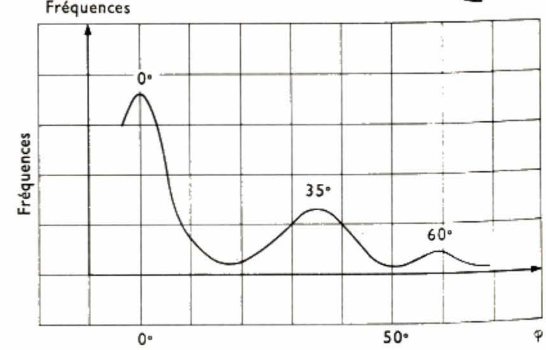


Fig. V-8 bis b — Forme de l'aile — Flèche. Ces caractéristiques influent beaucoup sur les qualités de vol, les fortes flèches sont nécessaires aux grandes vitesses

1.5. Fuselage et empennage. — On définit trois *centres aérodynamiques :* un pour chaque demi-aile, un pour l'aile complète et un pour l'empennage.

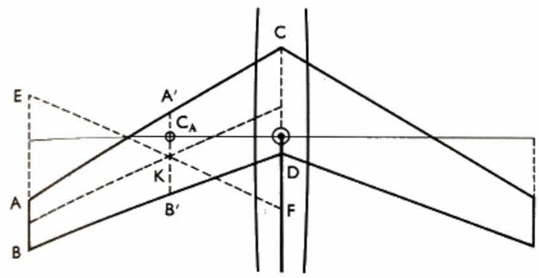


Fig. V-9 — Construction du centre aérodynamique d'une demi-aile en forme de trapèze ABCD

1° Tracer la médiane joignant les milieux des côtés AB et CD,
2° Prolonger AB d'une longueur AE égale à CD,
3° Prolonger CD d'une longueur DF égale à AB,
4° Joindre EF,
5° Tracer A'B' parallèle à AB et passant par l'intersection K de EF et de la médiane,
6° Le centre aérodynamique C_A est le milieu de A'K (attention ne pas confondre ce point avec le « foyer aérodynamique » !).

La figure V-9 indique de quelle façon nous pouvons, par un tracé géométrique simple, trouver le centre aérodynamique, dans le cas d'une demi-aile constituée de forme en plan trapézoïdale ou triangulaire (aile delta). On cherche d'abord la corde moyenne aérodynamique et sur cette corde on reporte un point au premier quart de la corde. Il convient de nommer ce point *centre aérodynamique de la demi-aile*. Pour l'aile entière on prend comme centre aérodynamique le milieu du segment joignant les centres aérodynamiques de chaque demi-aile.

Nous remarquerons que le centre aérodynamique n'est qu'un point géométrique particulier ; son intérêt est que le foyer aérodynamique (point auquel nous pouvons supposer la portance appliquée, du moins pour les ailes peu cambrées) en est très voisin. De la sorte le centre de gravité de l'ensemble aile-fuselage-empennage devra toujours lui aussi se trouver au voisinage du centre aérodynamique.

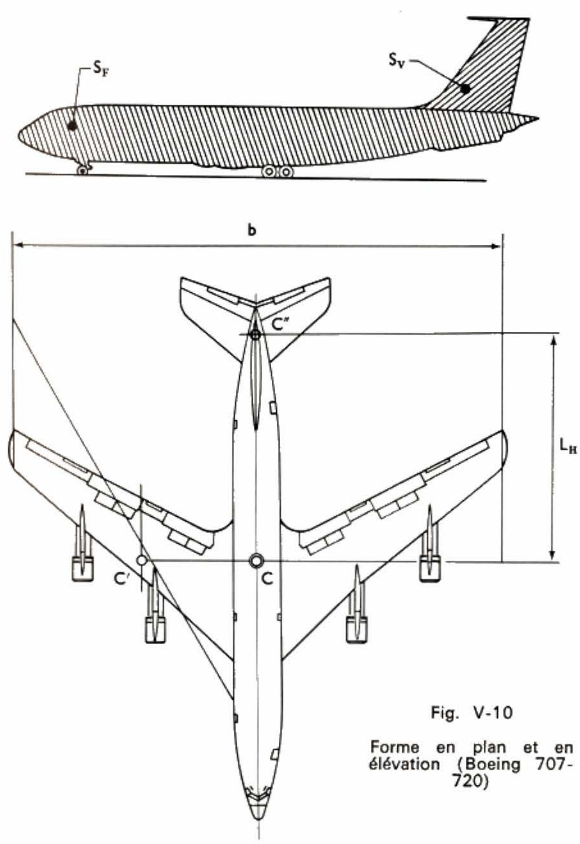


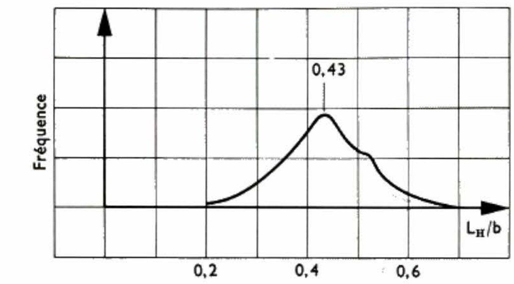
Fig. V-10

Forme en plan et en élévation (Boeing 707-720)

En haut : définition des surfaces latérales sur la vue en élévation. En bas : définition du bras de levier L_H de l'empennage. C, C', C'' désignent respectivement les centres aérodynamiques de l'aile entière, de la demi-aile gauche, de l'empennage

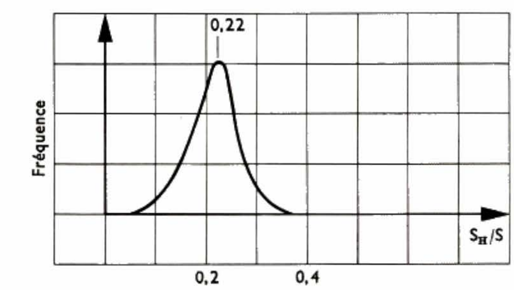
Le *bras de levier* de l'empennage est défini comme la distance entre le centre aérodynamique de l'aile et celui de l'empennage (fig. V-10).

Le bras de levier L_H de l'empennage horizontal en flèche ou delta, indiqué par les figures, n'est pas en relation directe avec la corde moyenne aérodynamique de l'aile.



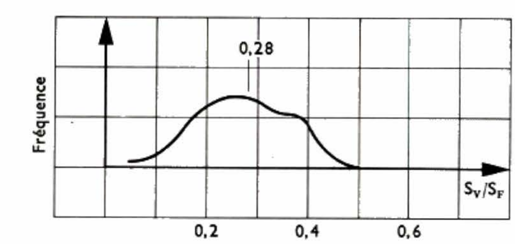
a

Rapport du bras de levier L_H à l'envergure b les plus fréquents



b

Surfaces d'empennage horizontal S_H les plus fréquentes (exprimées en fonction de la surface de l'aile S)



c

Surfaces de l'empennage vertical ou dérive S_V les plus fréquentes (exprimées en fonction de la surface latérale du fuselage S_F)

Fig. V-11

En fait, la valeur du rapport $\frac{L_H}{b}$ du bras de levier à l'envergure de l'avion évolue dans des limites assez étroites, comme l'indique la figure V-11 a ; la valeur la plus fréquente est 0,43 ; cela peut s'expliquer :

— par le souci de disposer l'empennage assez près de l'aile, afin de ne pas augmenter exagérément la longueur du fuselage, ce qui entraînerait un accroissement de la masse et, peut-être aussi, une gêne pour l'obtention des incidences souhaitables pour le décollage et l'atterrissage,

— par l'intérêt d'éviter une trop forte interaction du sillage de l'aile.

Le bras de levier de l'empennage une fois défini, la partie arrière du fuselage a donc une longueur définie. La longueur de la partie avant L_A est alors telle que, compte tenu des charges et de leur emplacement, le centre de gravité de l'ensemble aile + avion se trouve à un emplacement voisin du centre aérodynamique de l'aile ; le rapport $\frac{L_A}{F}$, en dési-

gnant par F la longueur totale du fuselage a deux valeurs fréquentes, la valeur 0,43 qui semble correspondre aux avions à ailes droites, et la valeur 0,63 qui semble correspondre aux ailes en flèche.

La surface totale de l'empennage horizontal est le plus fréquemment égale à 22 % de la surface de l'aile. Les valeurs extrêmes se situent de 0 % (avions sans queue) à 40 % (V. fig. V-11 b).

La surface totale de l'empennage vertical S_V est liée à la possibilité pour l'avion de voler avec une puissance ou une poussée dissymétrique, et aux conditions d'exécution du vol dérapé. La fréquence du rapport $\frac{S_V}{S_F}$ est donnée sur la figure V-11 c (page précédente).

Les gouvernes sont des volets mobiles permettant : sur l'aile, de provoquer un mouvement de roulis, sur l'empennage horizontal de faire piquer ou cabrer l'avion, sur l'empennage vertical de le mettre en dérapage à gauche ou à droite, ou d'empêcher ce dérapage.

Les proportions des gouvernes sont caractérisées par les valeurs suivantes :

— *ailerons :* la valeur la plus fréquente du rapport $\frac{S\alpha}{S}$ de la surface des ailerons à celle de l'aile est de 8 % ;

— *volet de profondeur :* la valeur la plus fréquente du rapport de la surface du volet S_β à celle de l'empennage horizontal S_H (volet + partie fixe) est de 35 %. À noter que pour l'empennage monobloc $\frac{S_\beta}{S_H} = 1$;

— *volet de direction :* la valeur la plus fréquente du rapport de la surface du volet à la surface totale de l'empennage est 30 %.

1.6. Forme en plan. — Ainsi les proportions des avions classiques sont fixées à l'intérieur de limites assez étroites ; la *silhouette* de l'avion, sur sa vue en plan, varie dans des limites que fixent pratiquement :

— la condition suivant laquelle l'empennage doit être placé à peu près à une demi-envergure du centre de gravité, règle qui doit être respectée à $\pm$ 10 % près environ, et qui est vraie aussi bien pour l'avion à ailes droites que pour celui à forte flèche ;

— la condition suivant laquelle le centre de gravité de l'ensemble aile-fuselage est approximativement situé dans le premier tiers de la corde moyenne aérodynamique moyenne de l'aile (la position précise du centre de gravité est fixée entre certaines *limites de centrage* avant et arrière, distantes de 10 à 20 % de la corde moyenne aérodynamique, et fixées par les conditions de stabilité et de maniabilité de l'avion).

1.7. Forme en élévation. — La « vue de côté » ou « vue de profil » d'un avion classique est caractérisée par la disposition relative de l'aile et de l'empennage, notamment la position en hauteur de l'empennage, elle-même souvent conditionnée par la position choisie des moteurs.

— moteurs montés dans des nacelles sous l'aile,

— moteurs noyés dans le fuselage ou l'aile (cas fréquent des avions de combat),

— moteurs montés à l'arrière du fuselage (montage rendu classique par l'avion *Caravelle*).

D'un point de vue aérodynamique l'essentiel est de placer l'empennage dans une position où le sillage de l'aile ne risque pas de l'atteindre ; un sillage est une zone d'écoulement tourbillonnaire à vitesse instable et réduite dans lequel les surfaces aérodynamiques perdent leur efficacité. Toutefois, sur les avions à hélice la zone d'écoulement accélérée par celles-ci est favorable à l'efficacité de l'empennage (mais il ne faut pas oublier non plus que les extrémités d'hélice déclenchent des tourbillons. La périphérie du jet d'air accéléré par une hélice est une zone où il ne faut pas placer l'empennage).

Toute aile normale donne naissance, à ses extrémités, à des tourbillons dits marginaux déclenchés par le « court-circuit » qui se produit, entre les hautes pressions de la partie inférieure de l'aile (intrados) et les dépressions de la partie supérieure (extrados) ; ces dépressions croissent en même temps que la portance de l'aile, c'est-à-dire quand l'angle d'attaque ou incidence) croît ainsi que le tourbillon correspondant. L'envergure de l'aile étant plus grande que celle de l'empennage arrière, ce tourbillon n'est pas gênant.

En revanche pour un avion *canard* doté d'un plan de stabilisation avant, ce plan canard déclenche des tourbillons qui peuvent atteindre l'aile et provoquer des difficultés.

Les ailes delta sont, elles, caractérisées par une portance très élevée aux très grands angles d'incidence utilisables, mais aussi par des *tourbillons d'apex* naissant à la pointe avant du delta, de chaque côté du fuselage, et intéressant une partie très importante de l'aile : l'écoulement derrière l'aile est perturbé partout. Le plus souvent, ces avions sont sans empennage. Les volets aérodynamiques (*élevons*) assurant l'équilibre font partie intégrante de l'aile. Nous n'en dirons pas plus pour le moment sur ce type d'avions.

Dans le cas des avions à empennage classique, le sillage de l'aile est une nappe très mince en vol normal et d'autant plus défléchie vers le bas que l'incidence est grande ; l'épaisseur de la nappe croît brusquement lorsque l'aile arrive à l'incidence de portance maximale dite incidence de décrochage. Au-delà de cette incidence la largeur et l'importance du ralentissement de l'écoulement dans la zone perturbée peuvent devenir si grandes qu'un empennage placé dans cette zone perd toute efficacité ; il est donc très important de dessiner l'avion de façon à éviter a priori cette zone pour l'empennage.

Compte tenu de la variation des incidences utiles, entre l'incidence de portance nulle et l'incidence de décrochage i_s [1], le sillage de l'aile fait avec la « corde de portance nulle » [2] un angle compris entre 0 et un angle un peu inférieur à l'incidence i_s ; le secteur ainsi balayé par le sillage aux incidences de vol normal est interdit à l'empennage (sillages en vol normal).

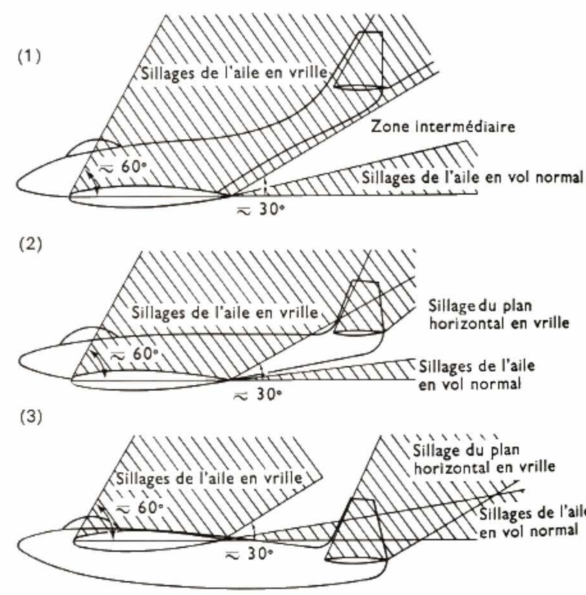


Fig. V-12 — Forme en élévation
Du choix de la position de l'empennage en hauteur dépendent les possibilités de revenir en vol normal après un engagement en vrille ou à très haute incidence

La figure V-12 présente les zones qu'il faut a priori éviter pour l'empennage, dans le dessin d'un avant-projet, les valeurs numériques ont un caractère empirique.

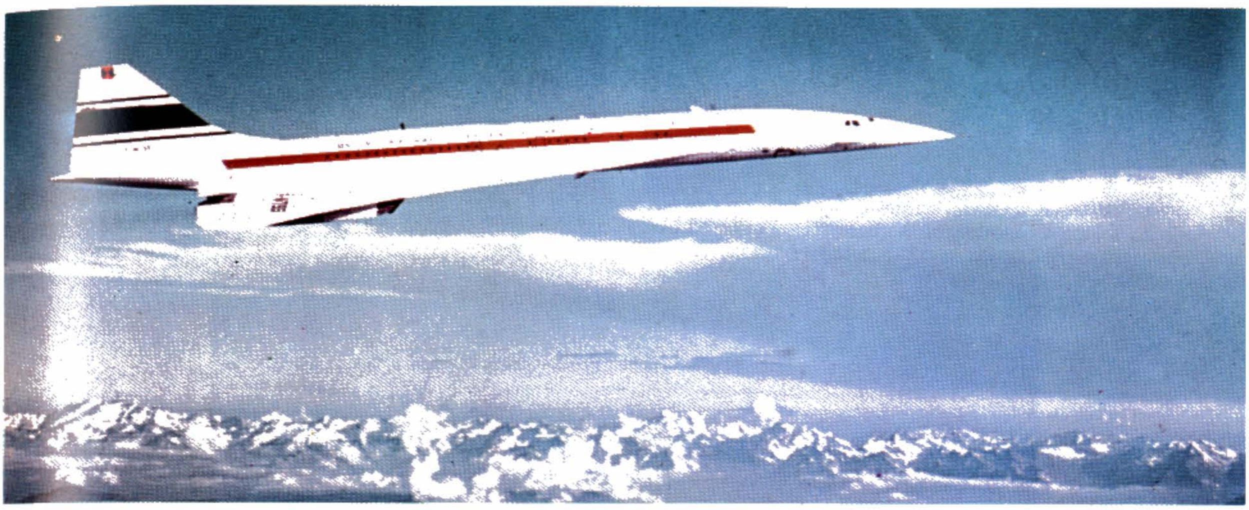
L'empennage très haut (1) favorable en vol normal risque d'être totalement masqué lorsque l'aile a décroché (empennage horizontal et vertical) ; de plus cette caractéris-

(1) Les incidences de décrochage sont d'environ 15 à 20° pour les ailes usuelles ; les ailes delta n'ont pas de décrochage marqué et elles peuvent fonctionner à des incidences beaucoup plus grandes.

(2) Nous appelons corde de portance nulle d'un profil d'aile, une référence géométrique telle que lorsque le vecteur vitesse de l'écoulement est parallèle à cette référence, la portance est nulle ; c'est généralement cette corde qui est utilisée comme référence des incidences. Dans ce cas, lorsque l'incidence est nulle, la portance est nulle.



L'aviation civile contemporaine



De haut en bas :

Airbus 300, moyen courrier biréacteur construit en participation européenne (Aérospatiale et Deutsches Airbus) ;

Concorde, prototype 001 du transport supersonique construit en participation franco-britannique (Aérospatiale et British Aircraft Corporation) ;

Mercure, moyen-court courrier (Avions Marcel Dassault - Bréguet Aviation) ;

Mystère 20, biréacteur d'affaires (Avions Marcel Dassault - Bréguet Aviation).





Photos : Aérospatiale, Avions Marcel Dassault - Bréguet Aviation.

L'aviation militaire contemporaine











De haut en bas, de gauche à droite : *Alpha Jet*, avion d'école et d'entraînement (Avions Marcel Dassault - Bréguet Aviation) ; Grumman F 14 *Tomcat*, avion de combat embarqué à géométrie variable ; *Gazelle* S. A. 341, hélicoptère à usages multiples construit en participation franco-britannique (Aérospatiale et Westland) ; *Mirage* F1, avion de combat (Avions Marcel Dassault - Bréguet Aviation) ; *Jaguar*, avion de combat construit en participation franco-britannique (Avions Marcel Dassault et British Aircraft Corporation).

Photos : Avions Marcel Dassault - Bréguet Aviation, U. S. Navy, Aérospatiale.

tique est très dangereuse, elle peut interdire complètement le retour au vol normal si le pilote a laissé l'avion s'engager à grande incidence : l'avion ne sort pas de la vrille ou du *deep stall* dans lequel il s'est engagé.

L'empennage haut (2) est favorable en vol normal mais risque aussi d'être masqué aux incidences supérieures à celles de décrochage ; le contrôle après décrochage risque d'être difficile, mais l'empennage horizontal n'est pas masqué si l'avion s'engage en vrille ; si l'empennage vertical comporte une partie fixe et un volet importants en dessous du plan horizontal, il peut être efficace pour la sortie de vrille.

L'empennage bas (3) est favorable aussi bien en vol normal qu'aux grandes incidences ou en vrille. Malheureusement il n'est pas toujours compatible avec la garde au sol nécessaire aux assiettes de décollage et d'atterrissage, c'est-à-dire avec la géométrie du train d'atterrissage.

Certains avions de transport récents à empennage très haut (dit en T), position favorable pour des réacteurs à l'arrière, présentent de gros inconvénients du fait qu'ils respectent mal cette règle empirique. Presque tous sont affectés du phénomène baptisé *deep stall* dans lequel, l'incidence de décrochage dépassée, il devient impossible de reprendre le contrôle de l'avion. Ce phénomène est si dangereux que pour la plupart des avions de transport affectés par cette configuration un dispositif automatique empêche de manière absolue le pilote d'atteindre l'incidence dangereuse.

1.8. Le train d'atterrissage. — Aujourd'hui, la plupart des gros avions sont munis de deux trains principaux rétractables sous l'aile et d'un train avant rétractable à roues orientables. Seuls, certains avions légers sont encore dotés de deux roues principales et d'une roulette ou « béquille » arrière. Mais pour tous, gros et petits, la géométrie du train doit permettre d'orienter l'aile à l'incidence de décollage ou à celle d'atterrissage lorsque les deux roues principales reposent sur le sol. Une telle incidence, inférieure à celle de décrochage, est généralement grande, par exemple, une dizaine de degrés. Pour réduire la résistance aérodynamique, comme on a intérêt à ce qu'à la faible incidence de vol de croisière le fuselage soit horizontal, celui-ci est généralement cabré à l'atterrissage et au décollage. La partie arrière doit alors être relevée pour permettre le cabrage de l'avion, nécessaire au décollage et à l'atterrissage (fig. V-13).



Fig. V-13

Forme arrière du fuselage et train d'atterrissage en relation avec l'incidence d'atterrissage ou de décollage (Douglas DC 8 Super 61)

1.9. Les autres parties mobiles. — Ce peuvent être les volets hypersustentateurs, à la partie de chaque demi-aile proche du fuselage, la pointe avant (cas de *Concorde*), et même chaque demi-aile.

Le dessin de tous ces éléments et de leur cinématique est extrêmement complexe et sortirait du cadre de cette introduction.

2. AVIONS DE LIGNE ET DE TRANSPORT

2.1. Conception générale. — La fonction d'un avion de ligne est :

— d'une part, de transporter un certain nombre de passagers avec leurs bagages, dans les meilleures conditions et à un prix aussi faible que possible, sur courtes, moyennes ou longues distances,

— d'autre part, d'assurer en même temps un trafic régulier, à une fréquence suffisamment grande.

Ces conditions sont souvent contradictoires : par exemple, l'utilisation d'avions à grande capacité de charge, plus confortables et plus économiques va à l'encontre du facteur fréquence ; elle n'est possible que sur des lignes à

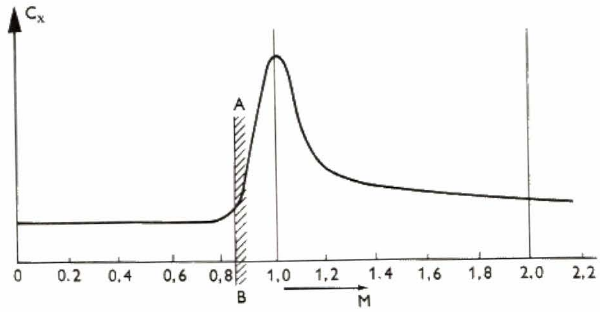


Fig. V-14 — Évolution du coefficient de traînée en fonction de la vitesse. AB : limite pratique des avions subsoniques

très grand trafic, comme celles de l'Atlantique Nord, de la traversée des États-Unis d'Amérique, ou de la traversée de la Manche, à certaines périodes de l'année. Il n'en est pas de même en cas de vitesse de croisière élevée car, en dehors du fait que cela constitue un puissant élément de concurrence par rapport aux autres moyens de transport, c'est un facteur favorable à un bon rendement économique du trafic aérien. En effet, le prix P_1 du billet pour 1 km à parcourir est approximativement proportionnel au prix de revient d'exploitation par kilomètre et par passager ; il peut s'exprimer par la formule suivante :

$$P_1 = \frac{P_{r/h}}{nV_b}$$

où $P_{r/h}$ est le prix horaire d'exploitation de l'avion ou prix de revient par heure de vol, n est le nombre moyen des passagers embarqués à chaque vol et V_b est la vitesse moyenne en kilomètres par heure du voyage dit « porte à porte » (c'est-à-dire qui tient compte de la perte de temps due au décollage, de la durée de montée en altitude, de celle de l'approche et de l'atterrissage) ou, en d'autres termes, la vitesse commerciale résultante en bloc. Ainsi les avions de grande capacité de charge (n étant grand) sont les plus économiques s'ils ne voyagent pas à vide ou peu remplis (*coefficient de remplissage* assez élevé). De plus, en concevant l'avion pour une grande vitesse de croisière, on obtient un prix de revient de l'heure ($P_{r/h}$), qui décroît avec cette vitesse et conduit à un prix de revient P_1 plus faible. C'est en partie pour cette raison que dans l'histoire des dernières années du développement des avions de ligne, ces vitesses ont été constamment accrues jusqu'à se rapprocher de la vitesse du son qui constitue la première barrière à ce développement (*barrière du son*). Rappelons que pour cette vitesse la traînée aérodynamique est fortement augmentée par rapport à sa valeur initiale (fig. V-14) ; cette traînée unitaire décroît à nouveau pour des valeurs supérieures à Mach 1, mais reste, néanmoins, plus élevée que dans le vol subsonique.

Pour que les avions supersoniques soient aussi économiques que les avions subsoniques actuels, il fallait les prévoir pour des vitesses au moins égales à Mach 2,8. Malheureusement, se présentent alors d'importantes difficultés de construction car les revêtements de ces avions auraient atteint des températures très élevées en croisière, obligeant à abandonner les alliages légers pour les remplacer par l'acier et le titane. On se trouvait ainsi devant la *deuxième barrière* de la vitesse : celle *de la chaleur*. Cela est la raison principale du choix, d'une vitesse plus faible, aux environs de Mach 2, pour les premiers avions supersoniques construits (Concorde, Tupolev 144) ; les alliages légers sont encore utilisables en acceptant le handicap d'une certaine perte de rendement.

2.1.1. Choix du système propulseur. — Assez longtemps la propulsion des avions de ligne a été réalisée au moyen d'hélices, entraînées par des moteurs à piston puis, plus tard, par des turbopropulseurs plus puissants et plus légers que ces moteurs. Cependant, l'accroissement de la vitesse des avions de ligne a conduit à l'abandon de ce mode de propulsion car les vitesses résultantes en bout de pales dépassaient la vitesse du son et cela entraînait des pertes de rendement assez sensibles. La limite pratique d'utilisation des hélices correspondant à des vitesses voisines de 700 km/h, les systèmes à hélices ont été remplacés par des propulseurs à réaction. Cependant, aujourd'hui encore, on utilise des avions de ligne à hélices en U.R.S.S., où le rendement ne joue pas un rôle essentiel, le prix de transport par avion étant imposé assez bas, afin de développer ce mode de transport en priorité (Antonov 24).

2.1.2. Charge alaire et rapport de la poussée à la masse. — La charge alaire (quotient de la masse maximale et de la surface de l'aile) est liée directement à la vitesse de l'avion. Le désir d'obtenir des vitesses de croisière élevées conduit à l'utilisation de charges alaires importantes pouvant atteindre 700 kg/m². Cela entraîne une augmentation des vitesses de décollage et d'atterrissage malgré l'utilisation de systèmes hypersustentateurs. Ces fortes charges alaires ont pour conséquence des décollages, pénibles et longs, qui nécessitent des pistes d'aérodromes dépassant souvent 3 000 m de long. L'atterrissage devient également plus difficile, avec un vol d'approche à faible pente (3°) et un « toucher le sol » à des vitesses élevées, atteignant souvent 300 km/h.

Lors du décollage, les moteurs sont utilisés à pleine puissance, pendant le roulement au sol et au début de la montée. Une fois l'appareil parvenu à une hauteur d'environ 300 mètres, la poussée est légèrement réduite, l'appareil marquant une courte trajectoire en palier ou en pseudo-palier. Cette opération, appelée « procédure », a pour but de limiter le bruit émis durant le survol des agglomérations entourant les aérodromes.

Lors de l'atterrissage, les réacteurs sont maintenus à régime réduit mais ils émettent à ce moment-là des bruits à hautes fréquences, donnant un fort sifflement sonore alors qu'ils survolent les localités à de faibles hauteurs (en raison des trajectoires à faible pente des avions) ; le bruit perçu reste très gênant.

Pour remédier à ces défauts plusieurs moyens sont en étude et en essais :

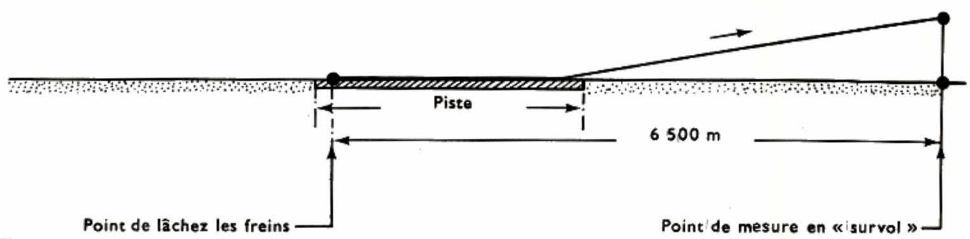
1° *Équipement des tuyères d'éjection de gaz par des silencieux* (à dilution ou à obstacles). Pour être utilisable, un silencieux ne doit pas être la cause d'une perte de poussée importante : il est donc souhaitable qu'il soit escamotable en croisière et il ne doit pas entraîner un freinage de l'avion au décollage. En effet, il ne faut pas que la valeur de la pente de la montée et que la hauteur du « survol » soient réduites, sinon l'amélioration espérée se trouve annulée.

2° *Emploi de revêtements spéciaux « antibruit »*, en sandwichs troués, pour garnir les entrées d'air et les tuyères d'éjection des gaz des réacteurs.

3° *Amélioration de la conception mécanique des moteurs*, par modification de la position et du nombre des pales des compresseurs.

Fig. V-15

Mesure du bruit au décollage



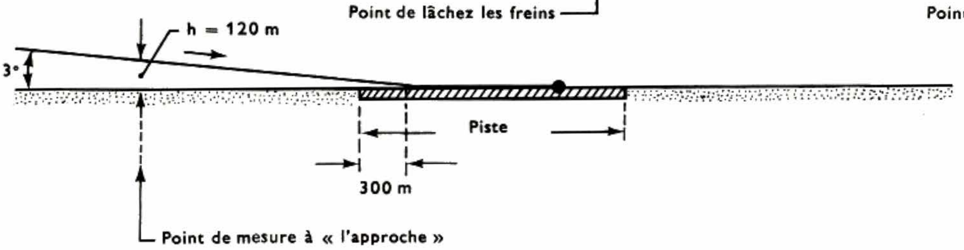


Fig. V-16

Mesure du bruit à l'atterrissage

Le rapport de la poussée à la masse indique le degré de « motorisation » de l'appareil. Son accroissement permet d'obtenir des vitesses plus élevées en croisière, et en même temps d'atteindre plus rapidement la vitesse de décollage. Cette motorisation poussée corrige ainsi le défaut dû à la charge alaire trop importante et les avions modernes se caractérisent, justement, par de fortes charges alaires et de forts rapports de la poussée à la masse, ces derniers pouvant atteindre 30 daN/kg.

Parfois, un rapport de la poussée à la masse élevé est nécessaire, pour des avions très rapides, afin de compenser une trop faible portance de l'aile. C'est le cas du Concorde dont l'aile en delta sans empennage est dépourvue d'un quelconque système hypersustentateur (le rapport de la poussée à la masse atteint exceptionnellement une valeur de 40 daN/kg).

L'accroissement de la « motorisation » n'agit pas sur les caractéristiques d'atterrissage.

Une forte motorisation augmente la masse à vide de l'avion et, par voie de conséquence, conduit généralement à la réduction de la charge payante.

2.1.3. Problème du bruit. — Les avions dotés de moteurs à réaction sont très bruyants au décollage et à l'atterrissage, ce qui est très gênant principalement pour les habitants des agglomérations proches des aérodromes.

4° *Développement des moteurs à forte dilution*, dotés de ventilateurs de grands diamètres.

L'O.A.C.I. a établi en décembre 1969, à Montréal, des limites du bruit pour tous les nouveaux avions. Rappelons que le bruit est mesuré en décibels EPN dB (*effective perception noise decibel*).

Ces limites sont les suivantes :

— en survol : 108 EPN dB pour des avions de 270 tonnes et 93 EPN dB pour des avions plus légers, de 34 tonnes au décollage (fig. V-15) ;

— à l'approche (fig. V-16) et latéralement à 650 mètres de part et d'autre de l'axe de la piste : 08 EPN dB pour les avions lourds et à 102 EPN dB pour les avions légers.

2.1.4. Position de l'aile. — Les avions dotés d'hélices dont le ou les moteurs étaient placés devant ou sous les ailes avaient automatiquement des « ailes hautes » (V. fig. V-17) encastrées sur le dos du fuselage afin que les extrémités des pales des hélices ne passent pas trop près du sol au moment du décollage ou de l'atterrissage. Ainsi, à l'arrêt, la partie inférieure du fuselage se trouvait assez près du sol et l'avion était d'un accès facile pour les passagers. En revanche, les jambes de l'atterrisseur (fixé sous les ailes) étaient longues et l'escamotage de ce dispositif était compliqué.

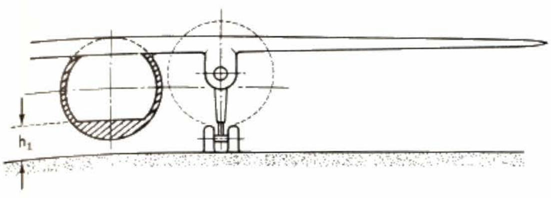


Fig. V-17 — Aile haute



Fig. V-18 — Aile médiane

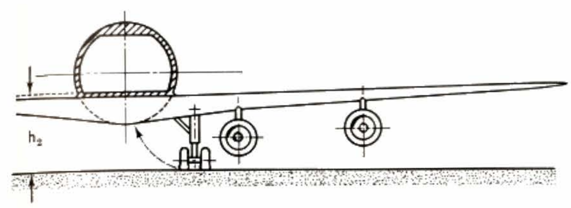


Fig. V-19 — Aile basse

Pour des avions de taille moyenne, il était difficile d'utiliser des « ailes médianes », aérodynamiquement les meilleures, car elles auraient traversé la cabine des passagers en son milieu (fig. V-18) ou auraient posé de délicats problèmes de construction. L'apparition des réacteurs a permis d'adopter des « ailes basses », encastrées sous le plancher du fuselage (fig. V-19). Cette solution permet d'adopter un atterrisseur principal plus court dont l'escamotage est simple. Les réacteurs étant en général suspendus sous les ailes, le fuselage se trouve placé relativement haut et l'embarquement ou le débarquement des passagers nécessite l'utilisation des grands escaliers mobiles.

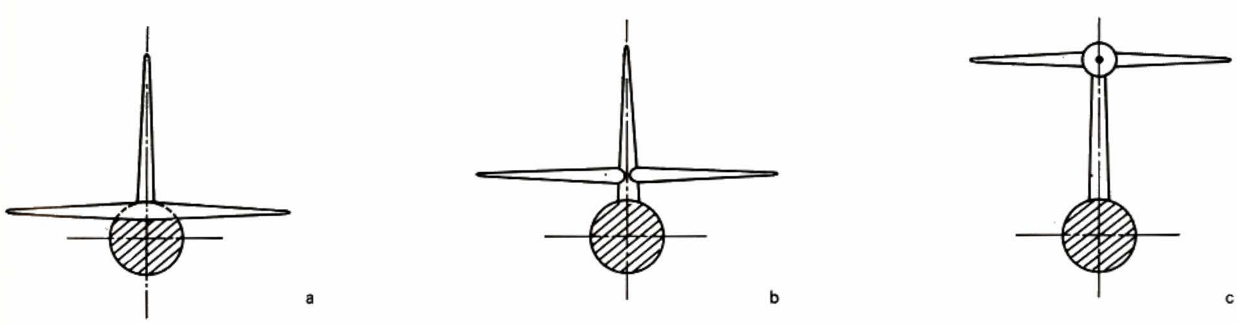


Fig. V-20 — Empennage horizontal. a : au dos du fuselage ; b : sur la dérive ; c : à l'extrémité de la dérive

2.1.5. Allongement de l'aile. — En croisière, une grande partie du trajet d'un avion subsonique a lieu à des altitudes comprises entre 8 000 et 10 000 mètres, où l'air est moins dense et où la traînée de l'avion est réduite. Pour cette raison, le coefficient de portance C_z nécessaire à la sustentation est assez élevé et le point de fonctionnement correspondant sur la polaire est proche de la finesse maximale de l'avion. On a donc tout intérêt à construire des avions à finesse élevée, ce qu'on obtient en premier lieu avec une aile à grand allongement λ :

$$\lambda = \frac{E}{C_m} = \frac{E^2}{S}$$

(E est l'envergure, C_m est la longueur de la corde moyenne, et S est la surface de l'aile.)

Des allongements trop importants augmentent les efforts à supporter à l'encastrement et alourdissent la cellule de l'avion. On a ainsi été conduit à un certain compromis : la valeur de l'allongement est comprise entre 6,5 (Trident) et 8 (Caravelle) ; pour les avions les plus récents l'allongement est proche de 7.

Il n'en est pas de même pour des *avions supersoniques* volant à de très grandes vitesses. Sur la polaire, le point correspondant se trouve placé très bas, loin de la finesse maximale, mais au voisinage de la traînée minimale et de ce fait un grand allongement n'est plus nécessaire ; pour ces avions dotés d'ailes « delta », les allongements peuvent être inférieurs à 2.

2.1.6. Position des empennages. — L'empennage horizontal placé dans l'axe, ou sur le *dos du fuselage* (fig. V-20 a) est le plus facile à réaliser, la base de fixation étant assez large pour lui assurer une rigidité latérale suffisante (Airbus 300, Boeing 707). Cette solution n'est plus admissible quand les moteurs sont placés contre les flancs de la partie arrière de fuselage. Pour soustraire cet empennage au souffle du jet, on est conduit à le fixer, soit à la partie basse de la dérive (fig. V-20 b) comme sur le Caravelle, soit à la partie supérieure de la dérive, en position dite en T (fig. V-20 c) comme sur le Vickers VC 10. Cette dernière solution entraîne un renforcement de la structure de la dérive et le montage d'une carène en forme de torpille, recouvrant l'intersection des plans des deux empennages.

2.1.7. Structure des plans porteurs. — Chaque aile ou plan fixe d'un empennage comprend un élément principal résistant pouvant supporter en même temps les moments de flexion et de torsion, ainsi que les efforts tranchants, provoqués par les efforts aérodynamiques et les réactions de l'atterrisseur. Différentes méthodes de réalisation ont été adoptées pour cet élément.

Ainsi, il peut comporter *deux longerons* à semelles travaillantes *a* et *b* (fig. V-21) ; les moments de flexion et les efforts tranchants sont alors subis uniquement par ces deux longerons. Ceux-ci sont entretoisés par des nervures *d* et supportent deux revêtements relativement minces, à l'intrados *e* et à l'extrados *f*, soutenus par des lisses longitudinales *g*. Ce système, qui a été couramment utilisé au début de la construction des avions, conduit à des semelles de longerons beaucoup trop importantes pour les avions modernes, conçus avec des charges alaires élevées. Aussi a-t-il été remplacé par un système dans

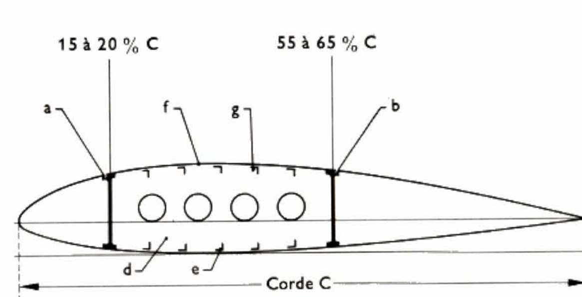


Fig. V-21 — Structure de l'aile à deux longerons

lequel la flexion est subie par un revêtement travaillant. Les longerons sont alors remplacés par deux (ou parfois trois) âmes, *a* et *b*, qui supportent les efforts tranchants (fig. V-22), leurs semelles servant seulement à la liaison avec le revêtement épais *c* et *d*. L'ensemble forme un *caisson* résistant à la torsion. Ce revêtement est réalisé soit

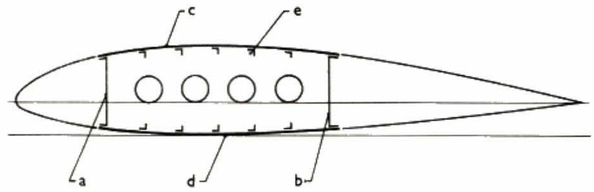
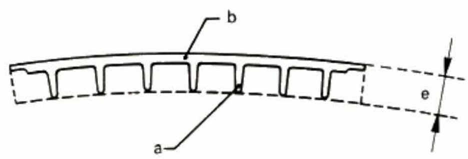


Fig. V-22 — Structure de l'aile à revêtement travaillant

à l'aide de bandes de tôle d'épaisseur décroissante, supportées par des lisses rapportées *e* (Boeing 707), soit d'une façon plus moderne, au moyen de panneaux fraisés dans la masse d'une plaque épaisse *e* (fig. V-23) en ménageant des nervures parallèles *a* qui font partie « intégrante » du revêtement *b* (Mercure et Boeing 747). Les liaisons des

Fig. V-23



Section d'un panneau fraisé dans la masse avec nervures intégrées

éléments sont réalisées soit par rivetage, soit par soudure électrique par points. On utilise également le collage métal-métal, à chaud et sous pression dans un autoclave.

2.1.8. Structure des fuselages. — Depuis plusieurs dizaines d'années, les fuselages sont monocoques; ils comportent un revêtement supporté par de nombreux couples et lisses en métal étiré.

L'intérieur du fuselage est soumis à une surpression en vol à moyenne et haute altitude, la cabine des passagers et le poste de pilotage étant conditionnés pour une pression correspondant à une altitude d'environ 2 500 mètres. Pour cette raison, et pour n'avoir que des tensions principales en traction dans le revêtement, la section des fuselages est le plus souvent circulaire.

Les liaisons entre les éléments sont exécutées de la même façon que pour les ailes. On utilise couramment des panneaux « pris dans la masse », dans la zone des hublots de la cabine des passagers.

2.1.9. Atterrisseurs. — Les premiers avions de transport de passagers étaient munis, d'une part, d'atterrisseurs dont les roues principales étaient placées en avant du centre de gravité de l'appareil, d'autre part, d'une béquille située à l'arrière. Au sol, l'appareil au repos restait incliné d'une quinzaine de degrés (fig. V-24). C'est seulement après la guerre de 1914-1918 que l'on a utilisé les atterrisseurs dits tricycles dans lesquels les roues principales sont situées à l'arrière du centre de gravité alors qu'un train à roues dites auxiliaires est placé à l'avant du fuselage (fig. V-25). La théorie et la pratique ont démontré que ce système est plus stable que le précédent et qu'il supprime presque le danger d'un capotage ou d'un « cheval de bois ». Au sol il permet de conserver le plancher des passagers sensiblement horizontal. De plus, il n'est pas plus lourd que le système précédent.

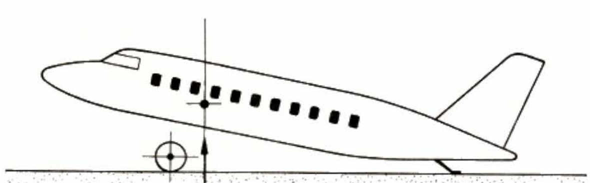


Fig. V-24 — Atterrissage avec béquille à l'arrière

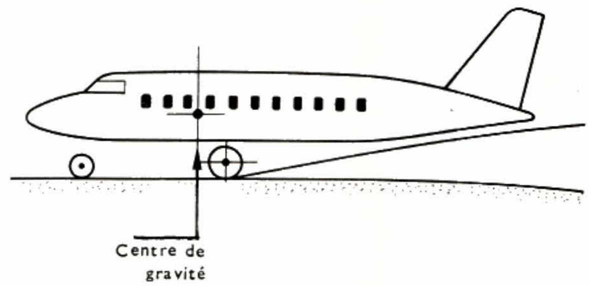


Fig. V-25 — Atterrisseur « tricycle »

L'atterrisseur représente une part importante de la traînée totale de l'avion et son escamotage après le décollage est devenu courant. Le train auxiliaire s'escamote dans la partie avant du fuselage, tandis que le train principal rentre dans l'aile, les roues occupant souvent une soute ménagée dans le fuselage. Les manœuvres de rentrée et de sortie s'effectuent sous l'action de vérins hydrauliques. Les soutes sont munies de portes qui se referment, l'atterrisseur rentré. Les dimensions de ces soutes étant assez limitées, on a été obligé de n'utiliser que des roues de dimensions moyennes, ce qui a nécessité d'augmenter leur nombre. Cette multiplication des roues assure une grande sécurité dans le cas d'une crevaison, et améliore la répartition de la charge sur le revêtement de la piste. À titre d'exemple, signalons que l'Antonov AN 24 est muni de deux roues jumelées par côté, que l'on trouve des bogies à quatre roues par côté sur la plupart des avions de masse moyenne (Airbus 300, Caravelle), des bogies à six roues par côté sur l'Antonov 144 et même à huit roues par côté, montées sur deux atterrisseurs indépendants, sur le Boeing 747 (fig. V-26).

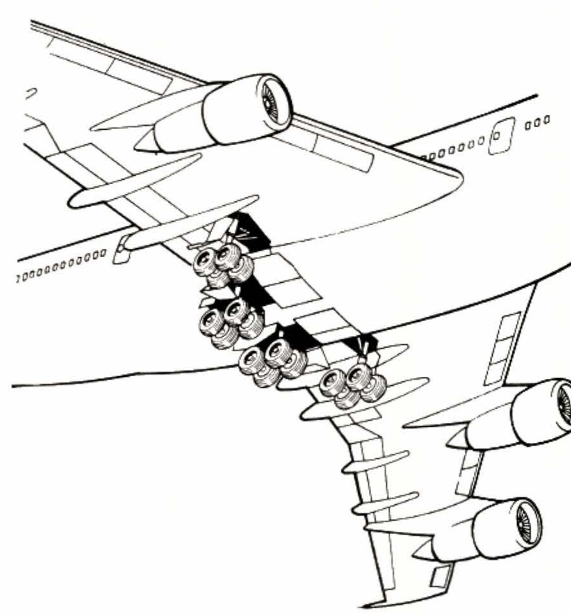


Fig. V-26 — Atterrisseur principal du Boeing 747
(*Shell Aviation News*)

2.1.10. Gouvernes. — Les premiers avions de transport avaient des gouvernes (plans mobiles des empennages et ailerons) dotées de compensations aérodynamiques, soit sous forme de surfaces situées en avant de leurs axes de pivotement, soit sous la forme de *tabs* automatiques ou élastiques (*springtabs*). Cela réduisait les efforts à exercer sur les commandes au poste de pilotage. Des *tabs* sont encore utilisés sur le Boeing 707.

Avec l'augmentation de la vitesse de vol, ces systèmes sont devenus insuffisants et ont été remplacés par des vérins hydrauliques asservis (servocommandes) sur les

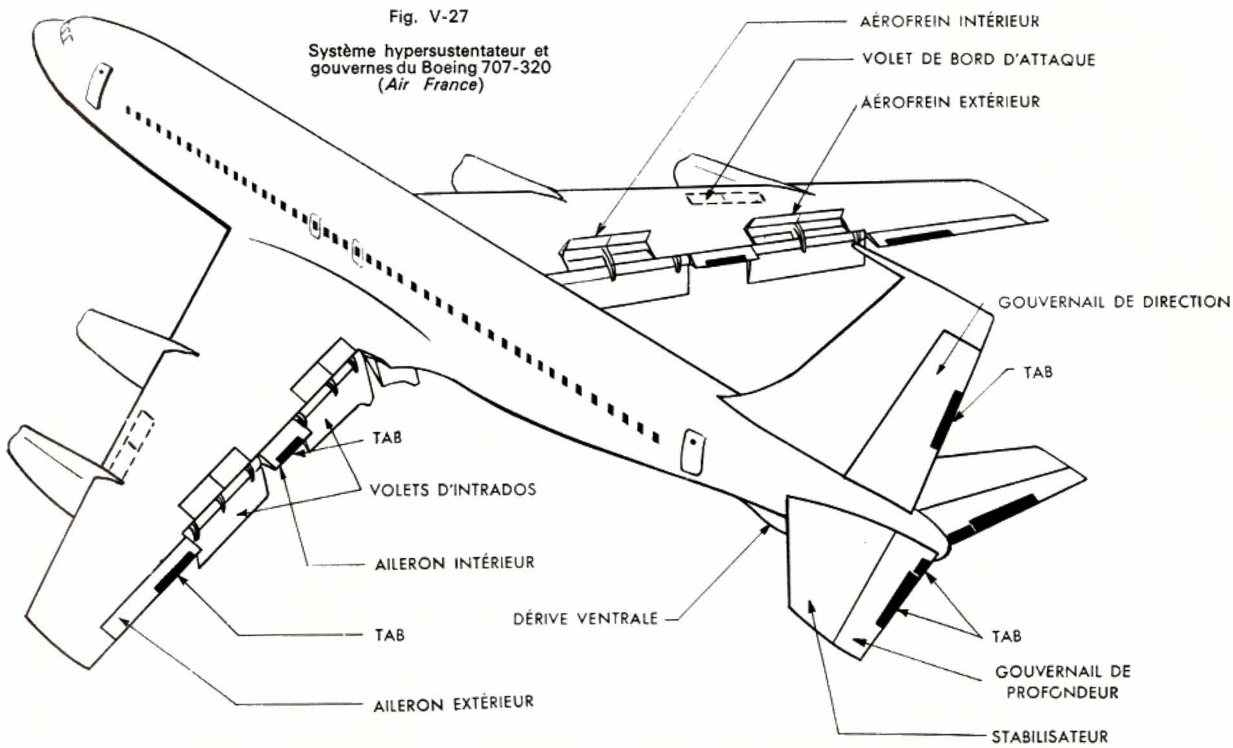


Fig. V-27
Système hypersustentateur et gouvernes du Boeing 707-320 (*Air France*)

avions les plus récents. Ces vérins actionnent directement les leviers des gouvernes. Par mesure de sécurité ils sont à double corps, étant alimentés par deux circuits hydrauliques indépendants.

Sur certains avions les ailerons ont été séparés en deux éléments, dont l'un est resté à l'extrémité de l'aile, tandis que l'autre se trouvait placé au milieu de l'aile, entre deux groupes de volets hypersustentateurs (fig. V-27) (Boeing 707, Boeing 747 et Lockheed « Tristar ».) Lors du vol en croisière et à grande vitesse, seul est utilisé l'aileron interne; l'aileron externe sert à basse vitesse. Cette disposition diminue le moment de torsion de l'extrémité de l'aile, dû à un brusque coup d'aileron.

Les extrados des ailes de nombreux avions sont munis de volets d'extrados (*spoilers*) placés en avant des volets d'atterrissage. Ils jouent le rôle d'aérofreins lors de l'approche à l'atterrissage. Souvent, ils sont également utilisés, avec un mouvement différentiel, comme aide au gauchissement (Mercure).

2.1.11. Commandes de vol. — Sur tous les avions de ligne le poste de pilotage est aménagé pour deux pilotes assis côte à côte. Chaque poste est pourvu d'un ensemble identique de commandes de vol : une colonne verticale, pouvant se déplacer vers l'avant et vers l'arrière, agit sur la profondeur, un volant à cornes permet le gauchissement et la direction est assurée au moyen d'un ensemble de deux pédales.

L'utilisation des servocommandes supprime toute réaction sur la main du pilote et il faut engendrer artificiellement certaines réactions (elles sont obtenues par des mécanismes appropriés, pour rappeler au pilote les réactions naturelles de l'avion). Ainsi le pilote doit exercer des efforts, qui croissent avec le débattement de la commande et sont, en même temps, fonction de la vitesse de l'avion.

Les commandes du poste pilote sont reliées (parfois à travers un « pilote automatique » mais plus généralement en parallèle avec ce dispositif) aux servocommandes des gouvernes, soit au moyen d'une tringlerie rigide, soit, plus souvent, au moyen de câbles, leviers et poulies.

2.1.12. Propulsion. — Les premiers moteurs à réaction des avions de lignes étaient des moteurs à simple flux : ils étaient composés d'un ou plusieurs compresseurs, montés à la suite l'un de l'autre, d'une chambre de combustion et d'une turbine. L'air était capté à l'avant au moyen de la manche à air et était éjecté à l'arrière sous forme de gaz brûlé.

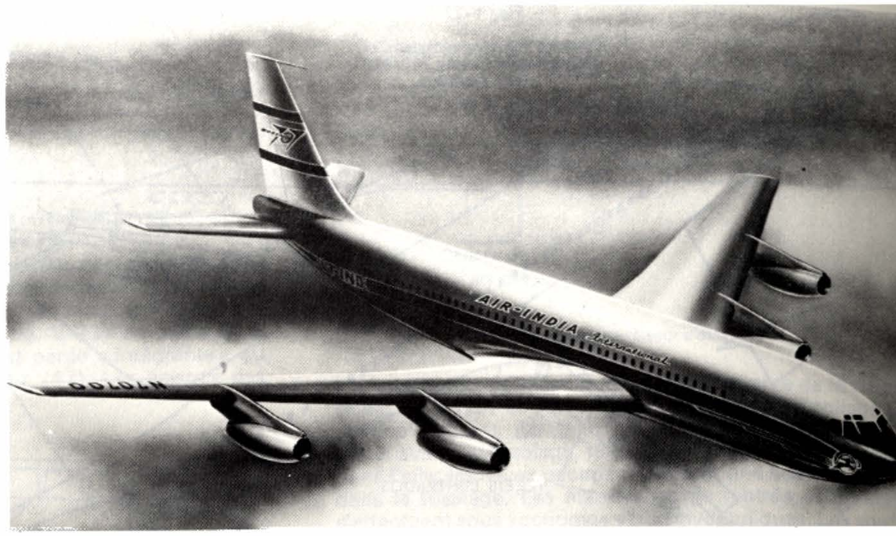
Par la suite, pour améliorer le rendement et donc la « consommation spécifique » (exprimée par la masse du combustible consommée par heure et par unité de poussée) on a vu qu'il y avait avantage à installer tout autour du moteur de base un deuxième circuit, cette fois-ci, en air comprimé. Cet air est alors propulsé par un ventilateur spécial entraîné par le moteur. Cela complique la construction, augmente le diamètre et la masse du moteur, mais l'importante baisse de la consommation compense largement ces pertes (elle diminue de 1,1 kg/daN . h à environ 0,78 kg/daN . h). De plus, ce moteur à double flux, avec jet de gaz chaud dilué par l'air du deuxième flux, est beaucoup moins bruyant.

Par souci de sécurité, on ne construit plus d'avions de ligne propulsés par un seul moteur : ce sont soit des bimoteurs, soit des quadrimoteurs. En principe, un bimoteur est plus léger (deux moteurs de puissance P pesant moins que quatre plus petits de puissance $\frac{P}{2}$). En outre, l'installation de deux moteurs simplifiait l'ensemble des aménagements : commandes des moteurs, nombre d'instruments de bord, circuits électriques, circuits hydrauliques, etc. En revanche, l'obligation impérative de pouvoir décoller sur une distance acceptable avec un moteur en panne obligeait le constructeur à prévoir une motorisation plus poussée, et, par conséquent, une certaine perte d'utilisation sur la masse totale de l'avion. Un quadrimoteur à moteurs suspendus sous les ailes présente un avantage certain en ce qui concerne la répartition des masses le long de l'envergure ; la décharge en vol réduit les moments et les efforts tranchants à l'encastrement des ailes et la masse de la structure de l'avion peut être diminuée. Par ailleurs, des avions de très gros tonnage, comme le Boeing 747 ne pouvaient être que quadrimoteurs car les moteurs fabriqués au moment de la conception de l'appareil n'étaient pas assez puissants.

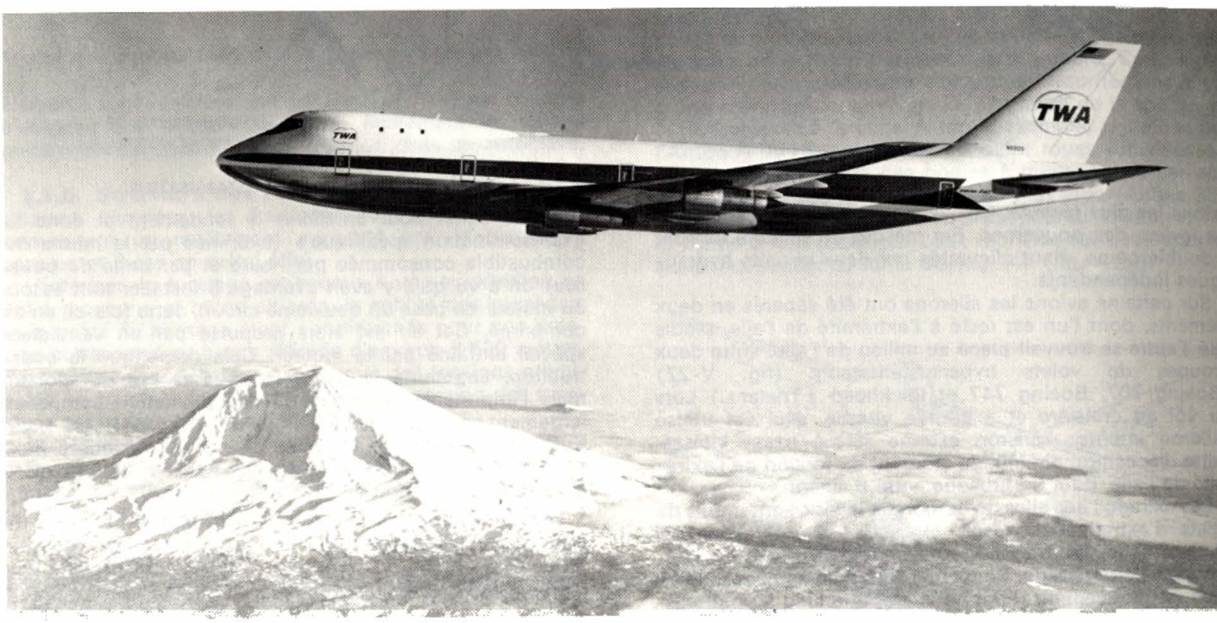
Le trimoteur représente un certain compromis entre les catégories précédentes ; deux avions gros porteurs récents sont trimoteurs : le Lockheed « Tristar » et le Douglas DC 10 qui comportent deux moteurs suspendus sous les ailes et un troisième logé dans la pointe arrière du fuselage.

Pour illustrer cet exposé général, le lecteur trouvera dans les planches suivantes les caractéristiques de quelques avions de ligne (subsoniques et supersoniques). Ils sont classés suivant la disposition de leurs moteurs.

Moteurs suspendus par pylônes sous les ailes



Boeing 707 est propulsé par 4 réacteurs Pratt & Whitney JT 4 A9. Poussée : 7 620 daN. Envergure : 43,4 m. Longueur : 46,6 m. Masse au décollage : 140 000 kg. Nombre de passagers : 122. Vitesse : 900 km/h (*Boeing*)



Boeing 747 est équipé de 4 réacteurs Pratt & Whitney JT 9 D. Poussée : 20 740 daN. Envergure : 59,6 m. Longueur : 70,5 m. Masse au décollage : 352 000 kg. Nombre de passagers : 490. Vitesse : 960 km/h (*Boeing*)



Airbus A 300 B est propulsé par 2 moteurs General Electric CF 6-50 A. Poussée : 23 000 daN. Envergure : 44,84 m. Longueur : 53,62 m. Masse au décollage : 137 000 kg. Nombre de passagers : 345. Vitesse : Mach 0,84 (1 224 km/h) (*Aérospatiale*)



Caravelle SE 210 est propulsé par 2 réacteurs Rolls-Royce « Avon » RA 29 MK 527. Poussée : 5 170 daN. Envergure : 34,30 m. Longueur : 32,01 m. Masse au décollage : 46 000 kg. Vitesse : 800 km/h (*Aérospatiale*)



Partie arrière du Trident 3 B équipé de 3 moteurs Rolls-Royce « Spey ». 25-MK 512. Poussée : 5 400 daN. Envergure : 29,87 m. Longueur : 35 m. Vitesse : 885 km/h (*Hawker Siddeley Aviation Ltd*)

Moteurs fixés à l'arrière du fuselage

Vickers VC 10 est propulsé par 4 réacteurs Rolls-Royce « Conway » MK 42. Poussée : 9 500daN. Envergure : 42,7 m. Longueur : 48 m. Masse au décollage : 140 000 kg. Vitesse : 890 km/h (*British Aircraft Corporation*)



Trimoteurs avec deux moteurs sous les ailes et un autre à l'arrière du fuselage

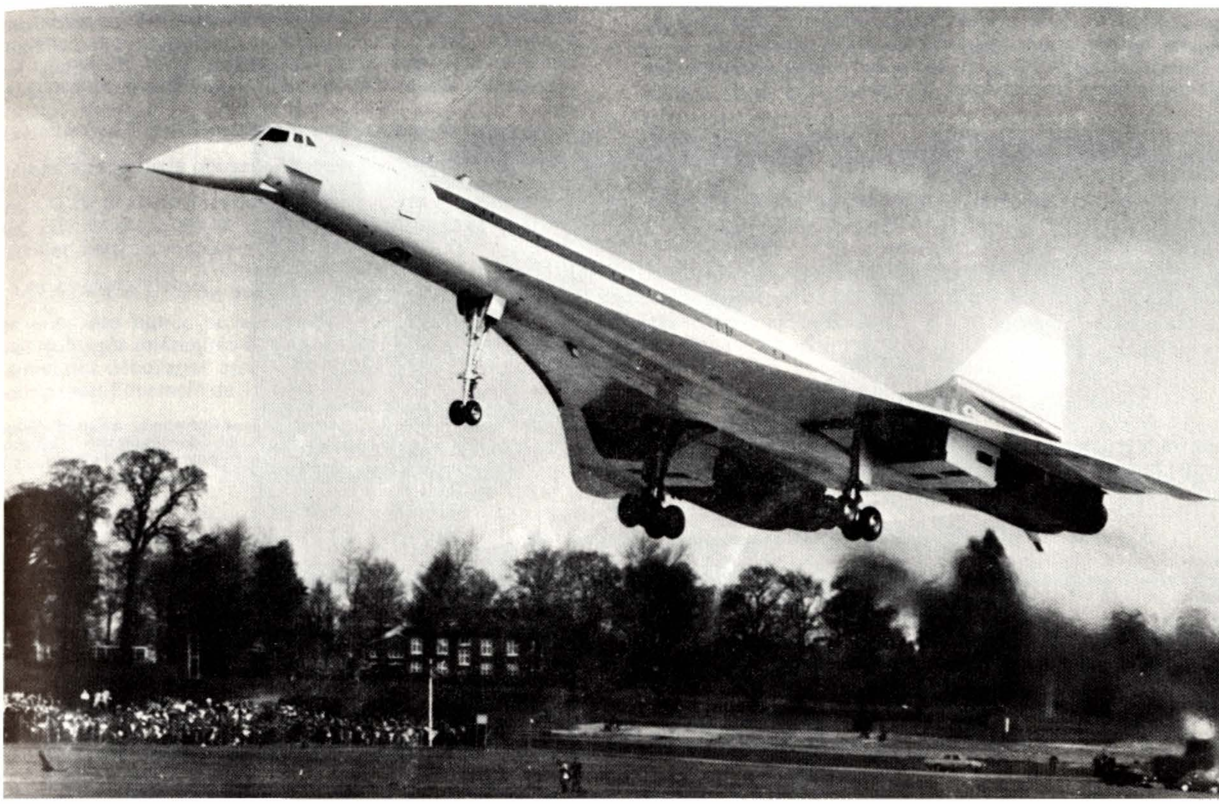


Lockheed L 1011 « Tristar » est équipé de 3 réacteurs Rolls-Royce RB 211-22 B. Poussée: 19 000 daN. Envergure: 47,34 m. Longueur: 54,46 m Masse au décollage: 195 000 kg. Nombre de passagers: 205 en classe mixte ou 345 en classe économique. Vitesse: 969 km/h (*Lockheed Aircraft*)

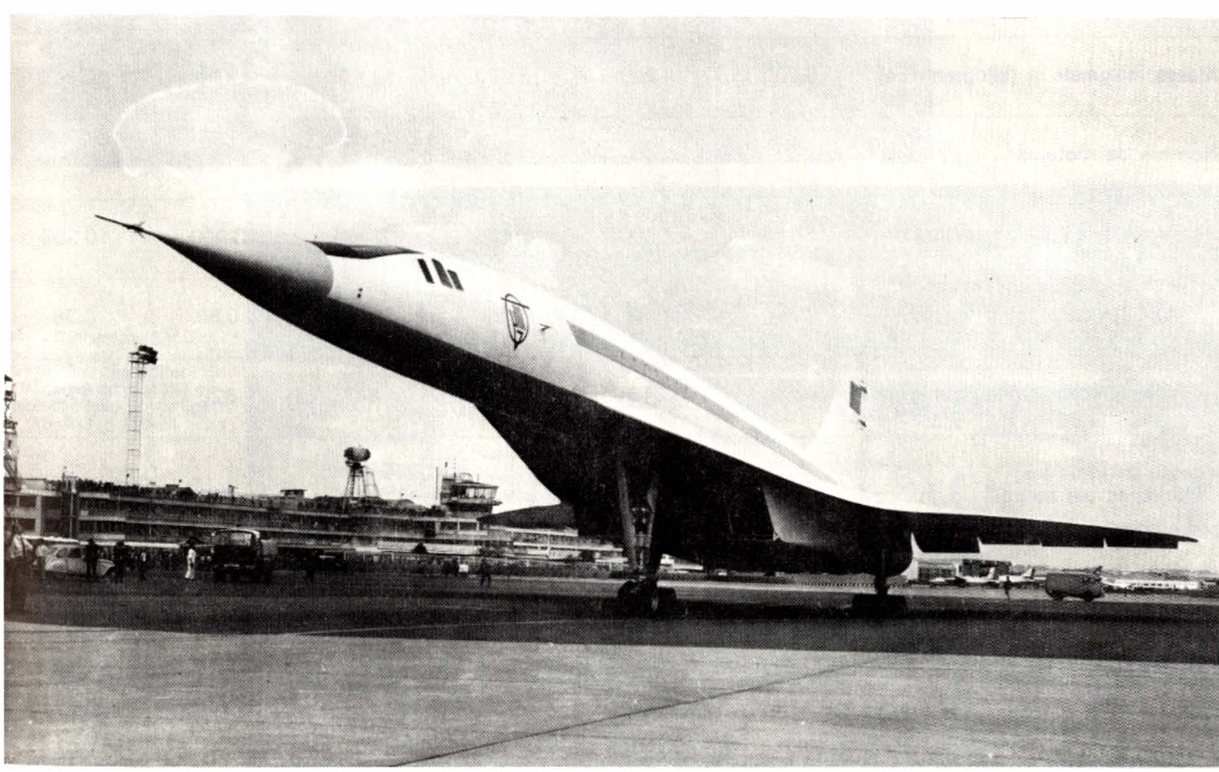


Douglas DC 10 équipé de moteurs General Electric CF 6 et Pratt & Whitney JT 9 D. Envergure: 47,37 m. Longueur: 55,50 m. Masse au décollage: 195 000 kg. Nombre de passagers: 270. Vitesse: 965 km/h (*CEDOCAR*)

Avions supersoniques



Concorde est propulsé par 4 réacteurs Rolls-Royce « Olympus 593 » à simple flux de 15 900 daN de poussée placés sous les ailes. Cet avion est prévu pour 128 passagers. Envergure : 25,5 m. Longueur : 62,17 m. Masse maximale au décollage : 175 000 kg. Vitesse : Mach 2 à 20 000 m d'altitude. L'appareil peut décoller sur une distance de 2 900 m et atterrir en 2 400 m. (*Aérospatiale*)

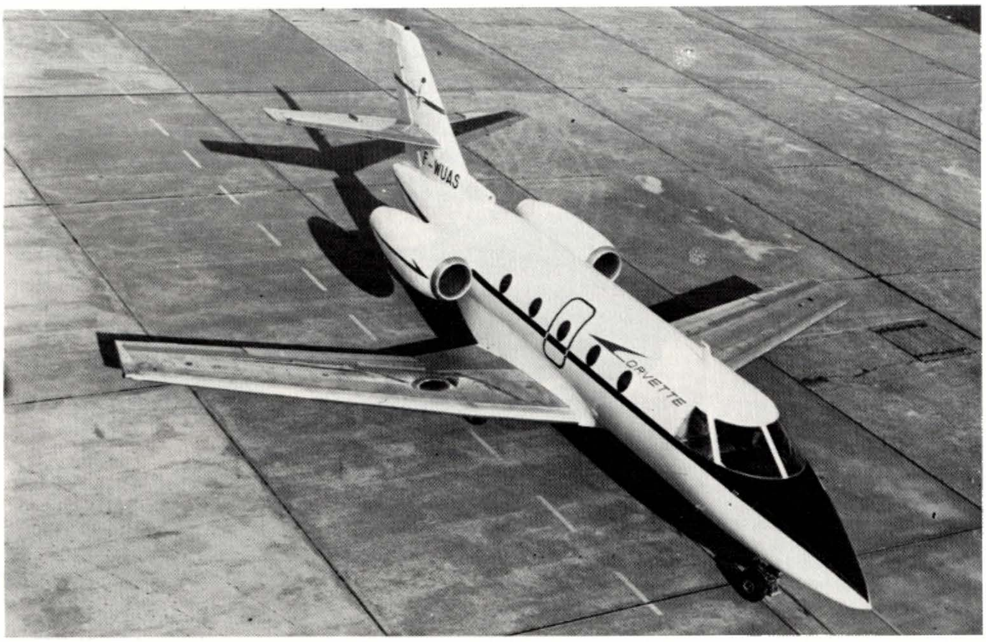


Tupolev T.U. 144 est équipé de 4 moteurs Kuznetsov NK-12 MV de 17 500 daN de poussée à double corps et à double flux placés sous le fuselage. Envergure : 27,6 m Longueur : 58 m. Masse totale au décollage : 150 000 kg. Vitesse 2 200 km/h à 15 000 m d'altitude (*CEDOCAR*)

3. AVIONS D'AFFAIRES

Conception. — En général, les avions d'affaires sont de même conception que les avions de ligne, mais leurs dimensions et leurs masses sont nettement plus petites. Ils sont utilisés pour transporter six à dix passagers.

Une frontière a été fixée entre les avions d'affaires (et éventuellement de transport d'appoint) dits de la « deuxième génération » et les appareils de « l'aviation générale » dits de la « troisième génération », en limitant la masse maximale de ces derniers à 5 700 kg (cette limite, qui peut apparaître comme assez arbitraire quant à l'utilisation des appareils, serait prochainement remplacée par celle du nombre de sièges pour passagers). C'est ainsi que les masses des avions d'affaires sont comprises entre 6 100 kg



« Corvette », avion d'affaires et de transport d'appoint pour 6 à 14 passagers (*Aérospatiale*)

Avions	Aéro-spatiale « Corvette »	Gates Learjet Corporation « Learjet »	H.F.B. « Hansa-320 »	Hawker « HS-125 »	Dassault Mystère « Falcon 20 »	Grumman « Gulf-stream II »
Masse maximale m (kilogrammes)	6 100	6 800	8 800	11 400	13 000	27 000
Nombre de moteurs	2	2	2	2	2	2
Poussée totale T (décanewtons) . .	2 100	2 600	2 600	3 400	3 900	10 300
$\frac{T}{m}$ (décanewtons par kilogramme)	0,34	0,38	0,29	0,30	0,30	0,38
$\frac{m}{S}$ (kilogramme par mètre carré) (1)	280	315	290	347	320	370
Vitesse de croisière (kilomètres par heure)	740	780	800	835	860	900
Hauteur de la cabine (mètres) . . .	1,52	1,37	1,75	1,75	1,72	1,76
Longueur de la piste de décollage (2) (mètres)	1 250	1 100	1 800	1 200	1 600	1 800
Passagers	6	6	7	7	10	19

(1) S: surface de référence de l'avion. (2) Décollage = Longueur pour franchissement des 15 mètres.

pour le « Corvette » de l'Aérospatiale et 27 000 kg pour le Grumman « Gulfstream II ».

Le tableau précédent groupe quelques caractéristiques de six avions de cette catégorie, classés suivant leur masse totale.

Tous ces appareils sont propulsés par de petits réacteurs, fixés contre les flancs arrière des fuselages, suivant le principe lancé par le « S.E. Caravelle ». La poussée des réacteurs croît régulièrement avec la masse au décollage mais le rapport de la poussée à la masse $\left(\frac{T}{m}\right)$ reste compris entre 0,29 et 0,38 décanewtons par kilogramme. Ce sont des valeurs assez élevées, mais nécessaires pour pouvoir décoller avec un moteur arrêté.

Les charges alaires $\left(\frac{m}{S}\right)$ sont également assez proches les unes des autres et se situent autour de 300 kg/m²; elles sont très inférieures à celles des avions de ligne. Cela permet des décollages assez courts (1 200 à 1 600 mètres) pour passer l'obstacle de 15 m de haut.

Les vitesses de croisière s'échelonnent entre 740 et 900 km/h pour une altitude moyenne de 8 000 m.

Les cabines de passagers sont assez réduites, mais elles peuvent tout de même recevoir deux rangées de fauteuils de part et d'autre d'un couloir central : une hauteur inférieure à 1,50 m ne permet pas de se tenir debout alors qu'une hauteur de 1,75 m suffit pour se déplacer assez facilement.

L'aménagement de la partie centrale de ces appareils constitue parfois une sorte de salon : des sièges qui se font vis-à-vis, de petites tables pour pouvoir travailler et même quelquefois une couchette placée contre l'une des parois de la cabine.

Tous ces appareils ont un rayon d'action assez grand qui peut atteindre et dépasser 3 000 km. Ils peuvent être transformés facilement pour le transport de passagers pour les lignes d'appoint; on installe alors jusqu'à quatorze passagers en configuration « économique », c'est-à-dire avec des sièges placés au pas le plus réduit.



« Hansa » H.F.B. 320 construit par Hamburger Flugzeugbau permet de transporter 2 pilotes et 7 passagers. Il est propulsé par 2 moteurs General Electric CJ 610 (*Georges Bruner*)



« Gulfstream II » construit par Grumman, permet de transporter 19 passagers. Il est propulsé par 2 moteurs Rolls-Royce Spey Mk 511-8 (*USIS*)



Mystère « Falcon 20 ». Il peut transporter 8 passagers. L'appareil est propulsé par 2 réacteurs General Electric CF 700 2 D-2 à double flux de 1 950 daN de poussée unitaire. Cet avion est utilisé pour le transport aérien civil régulier par Air France avec 14 passagers à bord, et également à des fins militaires comme avion de liaison des armées (*Avions Marcel Dassault*)



Le Lear Jet 25 C est conçu pour transporter 10 personnes et est propulsé par 2 réacteurs General Electric CJ 610-6 de 1 300 daN de poussée (*Michel Isaac-Air et Cosmos*)

4. AVIATION GÉNÉRALE

Sont compris dans cette catégorie tous les avions d'une masse inférieure ou égale à 5 700 kg. Ils sont utilisés pour l'apprentissage du pilotage, le tourisme, et, pour les appareils les plus importants, comme appoint aux services des lignes régionales.

En général, les vitesses de vol de ces appareils sont assez faibles : on cherche moins les performances en croisière que la possibilité de décoller et d'atterrir sur une distance courte et à de faibles vitesses, un pilotage facile et un prix de revient bas, ces avions étant destinés à une clientèle de particuliers.

Ces conditions ont conduit le constructeur à utiliser presque uniquement des moteurs à pistons entraînant des hélices. Cependant les appareils les plus importants sont équipés de turbopropulseurs entraînant des hélices (exemple : le 20 places I.A.I. Arava).

Pour les mêmes raisons, généralement ces appareils sont munis d'atterrisseurs fixes, non repliables, souvent avec des roues carénées. Les atterrisseurs sont presque toujours du type tricycles ; parmi les rares exceptions citons le Piper Super Cub qui a un atterrisseur à béquille arrière.

Nous distinguerons trois catégories parmi ces avions ; leurs principales caractéristiques sont données par les tableaux ci-après :

1° *Les biplaces et triplaces* destinés à l'école de pilotage et à l'entraînement (charges alaires très faibles : 50 à 65 daN/m²; atterrissage aisé à une vitesse voisine de 70 km/h),

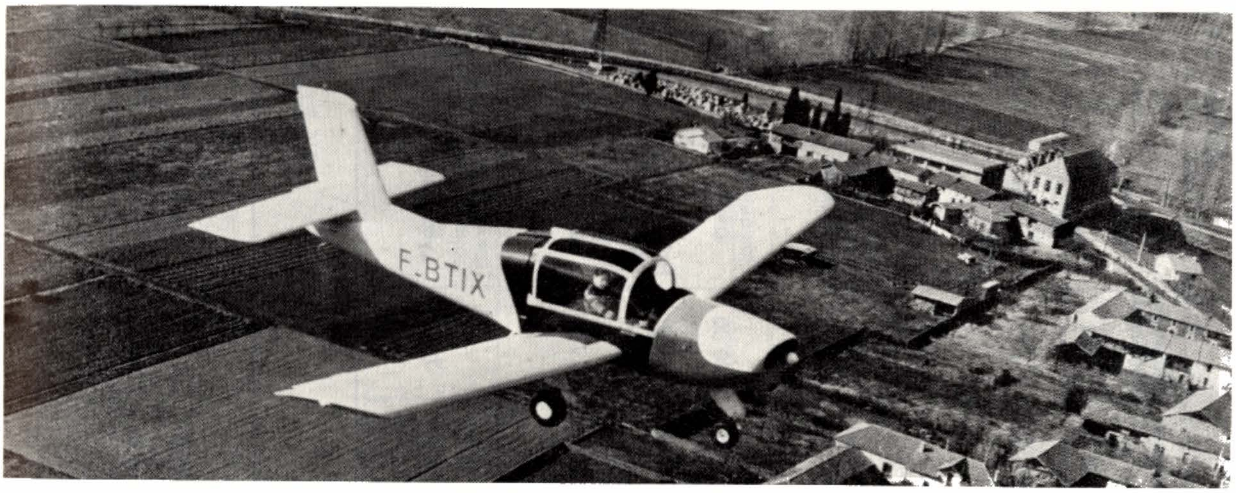
2° *Les quadriplaces*, qui sont les véritables avions de voyage (charges alaires comprises entre 65 et 79 daN/m²; atterrissage sur terrain en herbe de 600 m),

3° *Les six à vingt places*, appareils de grand tourisme utilisables pour les lignes régionales d'appoint.

Les biplaces-triplaces



« 150 Club »
(*Reims-Aviation*)



« Rallye 100 »
(*Aérospatiale*)



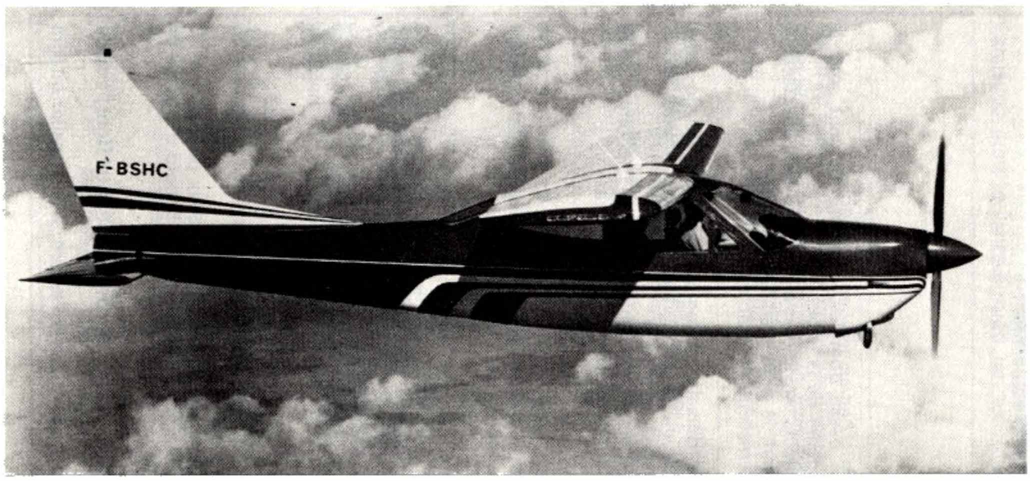
« HR 200/100 Club »
(*Avions Pierre Robin*)

Biplaces-triplaces

Constructeur (type)	Envergure (m)	Longueur (m)	Surface (m²)	Masse au décollage (kg)	Moteur	Puissance (ch) (kW)	Vitesse croisière (km/h)	Autonomie (km)	Distance pour décollage (m) *	Autres caractéristiques et utilisation
Avions Mudry (F) « Cap 10 »	8,07	6,57	10,85	760	Lycoming	180 130	250	1 000	360	— Construction en bois — Biplace côte à côte — Aile basse mono-longeron — Atterrisseur principal à deux roues carénées — Avion de perfectionnement et de voltige
CESSNA Reims-Aviation (F) « 150 Club »	11,10	7,20	14,80	726	Rolls-Royce Continental	100 75	188	770	400	— Aile dorsale soutenue par un seul mât par côté, à profil constant dans la partie centrale, puis décroissant sur les porte-à-faux — Amortisseur de l'atterrisseur principal constitué par des lames d'acier jouant le rôle de ressort — Structure entièrement métallique, très étudiée pour la série
Aérospatiale SOCATA (F) « Rallye-Club »	9,60	6,80	12,30	770	Rolls-Royce Continental	100 75	173	850	300	— Aile droite rectangulaire à profil constant ; semi-basse ; fort dièdre positif. Bec de bord d'attaque sur toute l'envergure — Atterrisseur tricycle fixe — Peut être utilisé pour des travaux agricoles, en plaçant une rampe de gicleurs au bord de fuite de l'aile, ou un atomiseur à l'extrados — Peut, éventuellement, recevoir un quatrième passager
Avions Pierre Robin (F) « HR 200 Club »	8,30	6,70	12,50	760	Lycoming	100 75	215	1 080	330	— Aile droite, basse, en porte-à-faux, à profil constant. Fort dièdre positif — Atterrisseur tricycle fixe, caréné, de voie très large — Dôme entièrement transparent, en forme de bulbe pour recouvrir les deux passagers
Quadriplaces										
Piper Aircraft Corporation (É.-U.A.) « Cherokee 180 »	9,14	7,20	14,80	1 090	Lycoming	180 130	230	1 100	400	— Aile basse, en porte-à-faux, à profil constant ; dièdre positif important — Atterrisseur tricycle à grande voie, fixé sous la voilure — Pare-brise panoramique et fenêtres latérales pour les passagers
Aérospatiale SOCATA (F) « Rallye 220 GT »	9,61	7,25	12,20	1 100	Franklin	220 156	240	1 600	120	— Aile basse, à bec de sécurité — Atterrisseur tricycle ; train principal fixe — Avion pouvant décoller et atterrir sur des terrains de dimensions réduites

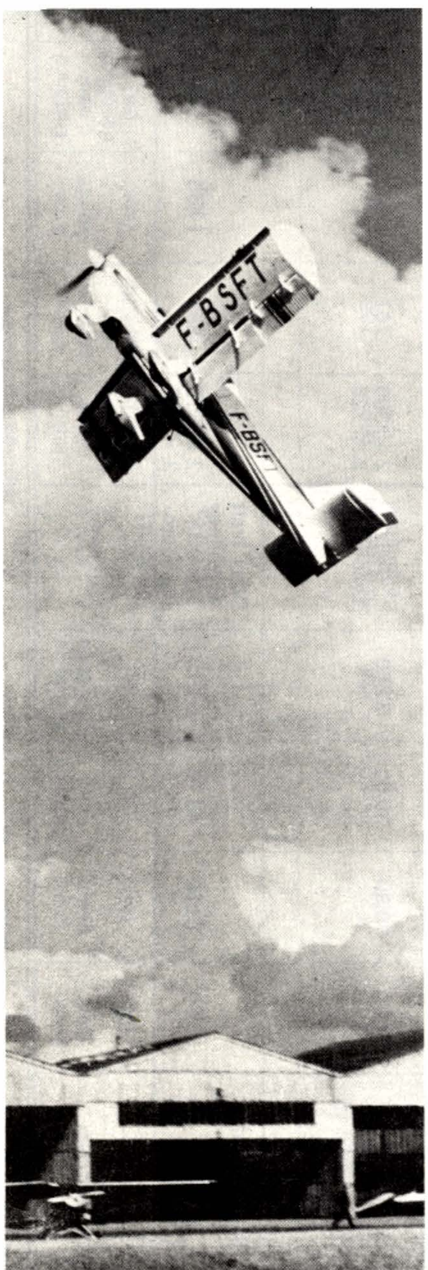
CESSNA Reims-Aviation (F) « F 172 »	10,90	8,20	16,20	1 040	Rolls-Royce Continental	145 106	224	1 130	465	— Aile dorsale, soutenue par un mât — Empennage encastré au dos du fuselage — Atterrisseur tricycle à roues carénées ; amortisseurs constitués par des lames d'acier — Visibilité totale
« F 177 » Cardinal	10,80	8,31	16,16	1 270	Lycoming	200 147	267	1 300	480	— Aile dorsale, en porte-à-faux — Empennage encastré sous le fuselage — Atterrisseur tricycle éclipsable — Visibilité excellente
Six à vingt places										
Beechcraft Aircraft Corporation (É.-U.A.) Baron « E. 55 »	11,50	8,80	19,00	2 400	Deux Rolls-Royce Continental	2 × 285 2 × 210	370	1 800	400	— Aile basse dont les longerons passent sous le plancher de la cabine — Moteurs 6 cylindres à plat fixés dans des nacelles devant le bord d'attaque de l'aile — Atterrisseur éclipsable
CESSNA Reims-Aviation (F) « Skymaster »	11,60	9,00	18,20	2 100	Deux Rolls-Royce Continental	2 × 210 2 × 155	311	2 000	350	— Aile dorsale soutenue par une paire de mâts. Empennages supportés entre deux poutres accrochées à la voilure — Moteurs placés l'un à l'avant de la cabine, l'autre à l'arrière entre les deux poutres
Piper Aircraft Corporation (É.-U.A.) « Navajo »	12,40	9,9	21,30	30,00	Deux Lycoming	2 × 300 2 × 220	400	2 350	470	— Aile basse — Existe diverses versions équipées de moteurs plus puissants
Britten Norman (G.-B.) « Islander »	14,90	10,90	30,00	2 860	Deux Lycoming	2 × 300 2 × 225	267	1 200	330	— Aile dorsale — Moteurs placés dans les carènes sous les ailes, au droit des jambes verticales de l'atterrisseur, non rétractable — Cinq rangées de deux fauteuils, les unes derrière les autres, sans couloir central. Accès par trois portes
Israël Aircraft Industrie « Arava »	20,90	13,00	43,70	5 670	Deux Pratt & Whitney Canada (turbopropulseurs)	2 × 715 2 × 525	337	1 450	300	— Aile dorsale, soutenue par un mât de chaque côté de la cabine — Empennages supportés par deux poutres — Turbopropulseurs placés sur le bord d'attaque de l'aile, au droit des poutres — Atterrisseur tricycle, fixe — Quatre rangées de cinq fauteuils de front ; couloir quasi central — Accès par porte à l'arrière avec escalier intégré

* Distance nécessaire pour un passage à l'altitude de 15 m.



« F 177 »
(*Reims-Aviation*)

Les quadriplaces



« Rallye 220 GT »
(*Aérospatiale*)

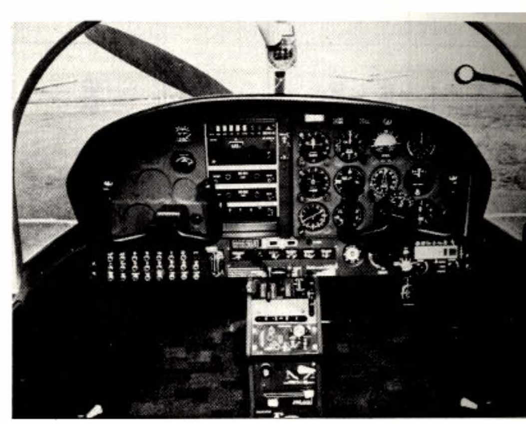


Planche de bord du
« Rallye 220 GT »
(*Aérospatiale*)

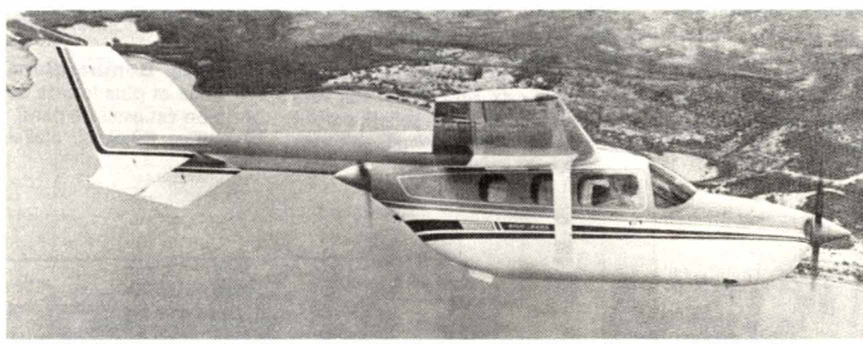


« F 172 » (*Reims-Aviation*)

Les six à vingt places



« Baron E55 » (*Beechcraft Aircraft corporation*)



« Skymaster » (*Reims-Aviation*)

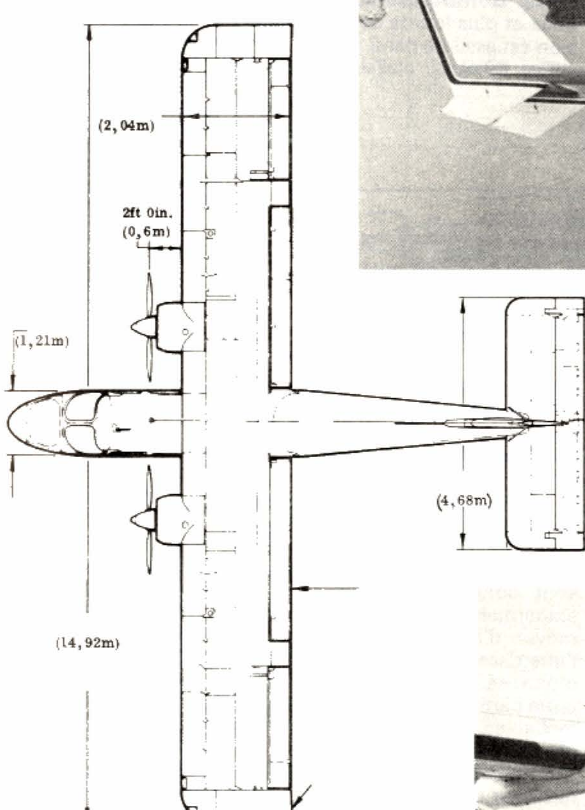
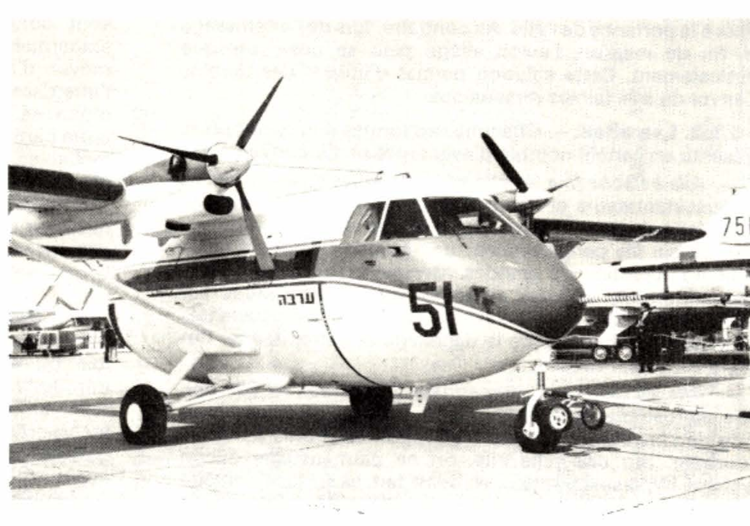


Schéma du « Islander » (*Britten Norman*)

« Arava » (*Israël Aircraft Industrie*)



5. AVIONS MILITAIRES

Les avions militaires peuvent être classés en quatre catégories : intercepteurs, bombardiers, avions embarqués et avions cargos-militaires.

5.1. Intercepteurs et avions de soutien des troupes au sol. — Tous les avions de cette catégorie, porteurs de bombes et de roquettes, sont conçus de façon à pouvoir être adaptés soit au rôle d'intercepteurs (pour le combat en altitude), soit au soutien des troupes au sol (et à l'attaque des troupes ennemies).

Ces avions sont monoplaces ou biplaces. Dans le cas des monoplaces, il a été prévu des versions avec un deuxième poste de pilotage, placé en tandem, pour des vols d'observation, ou pour l'entraînement des pilotes.

5.1.1. Quelques particularités concernant les moteurs. — Le plus souvent un seul moteur suffirait (Mirage III, Saab 37, et Harrier) mais c'est par mesure de sécurité que les bimoteurs sont préférés.

Les moteurs sont placés, sauf pour le Harrier, dans la partie arrière des fuselages, côte à côte pour les biréacteurs. Ils sont dotés de *rechauffes* (ou postcombustion).

Ce procédé, qui augmente très fortement la poussée mais, en même temps, la consommation de kérosène, n'est utilisé que pendant de très courtes périodes du vol, surtout au décollage, parfois lors de la montée, ainsi que pour accélérer l'appareil au combat.

Le Hawker Harrier est doté d'un moteur à double flux à *éjection vectorielle :* quatre tuyères latérales, pivotantes autour d'axes horizontaux, permettent de diriger les jets soit vers l'arrière pour le vol classique (f_1 fig. V-28), soit vers le bas pour un décollage ou un atterrissage sensiblement vertical (f_2) (VTOL : *Vertikal take-off and landing*), soit vers

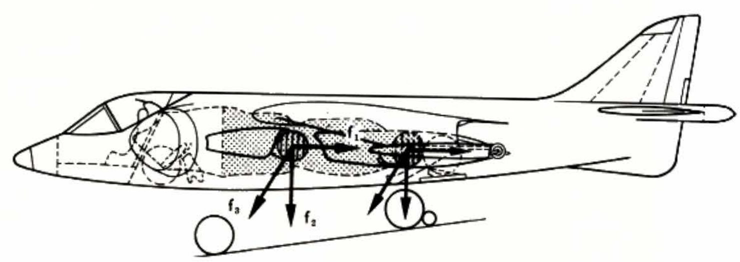


Fig. V-28

Hawker Harrier en coupe
(*Shell Aviation News*)

l'avant à 20° par rapport à la verticale pour freiner l'appareil (f_3). Ce moteur est obligatoirement placé au centre de gravité de l'avion. En utilisation pratique, la poussée verticale étant plus faible que le poids total de l'avion, ce type d'avion décolle « court », sur une distance d'une cinquantaine de mètres (STOL : *Short take-off and landing*). La poussée des jets est d'abord dirigée horizontalement pour accélérer l'appareil sur sa trajectoire, puis à la fin de cette phase, elle est brusquement orientée vers le bas : elle s'ajoute alors à la portance de l'aile. Au contraire, lors de l'atterrissage en fin de mission, l'avion allégé peut se poser presque verticalement. Cette solution permet d'utiliser des terrains d'envol de très faibles dimensions.

5.1.2. Les ailes. — Chacune des formes d'ailes adoptées présente un certain nombre d'avantages et d'inconvénients :

— *Aile à flèche fixe.* — Elle permet d'utiliser des systèmes hypersustentateurs et d'accroître la portance au décollage et à l'atterrissage. L'angle de la flèche à une grande influence sur les performances : une grande flèche est favorable à l'obtention de grandes vitesses de vol, en retardant l'apparition de vitesses soniques ou supersoniques sur l'aile, mais elle gêne l'action des systèmes hypersustentateurs et rend plus difficile le décollage et l'atterrissage. Cet angle est voisin de 40°.

— *Aile en delta sans empennage horizontal.* — Elle doit être autostable, soit grâce à un vrillage des profils le long de l'envergure, soit par l'adoption de profils à double courbure. Sur une telle aile, on ne peut installer aucun système hypersustentateur, et, de ce fait, sa surface doit être plus grande, avec une charge alaire réduite (pour le Mirage III : $\frac{m}{S} = 350$ kg/m²). En revanche, la grande profondeur de l'aile à l'encastrement donne des hauteurs d'encastrement importantes, sans augmenter l'épaisseur relative du profil, et allège ainsi beaucoup la structure de l'appareil.

— *Aile en delta avec empennage.* — Pour parer à l'inconvénient de cette aile en delta pur, l'avion suédois Saab 37 possède un empennage avant dit « en canard ». Cet empennnage permet d'utiliser des volets sur l'aile et, en même temps, ajoute sa propre portance à celle de l'aile aux faibles vitesses (c'est l'inverse qui se passe avec un empennage arrière). Évidemment, cette solution est plus compliquée et plus lourde que la prédédente.

— *Ailes à géométrie variable.* — La nécessité d'accroître les performances et d'obtenir des avions largement supersoniques a conduit à expérimenter les ailes à « géométrie variable », dont une partie pivote autour d'un axe vertical, d'avant en arrière. Lors du décollage et de l'atterrissage l'aile est déployée et la flèche est faible : 11° à 12° ; elle est repliée vers l'arrière pour les vols à grande vitesse et la flèche atteint 63° ou 64°. Dans le même but, la partie centrale fixe de l'aile est prolongée par un *apex* à l'avant. Ce système oblige à maintenir l'aile au moyen d'un très important pivot, qui doit transmettre l'ensemble des efforts de flexion et de torsion ainsi que les efforts tranchants. Ce mécanisme, assez compliqué, augmente la masse de l'appareil. Néanmoins, il semble qu'une bonne réalisation de ce système donne, en fin de compte, un bilan de masse positif.

5.2. Bombardiers. — Ils sont, en général, plus volumineux et plus lourds que les avions précédents. Leur propulsion est assurée par 2 ou 4 ou même 8 réacteurs.

Les bombes, classiques ou nucléaires, sont logées soit sous le fuselage, soit dans des soutes aménagées dans la partie inférieure de ces fuselages.

On distingue deux catégories de bombardiers :

— Les bombardiers *tactiques*, destinés à des opérations à courtes distances.

— Les bombardiers *stratégiques* dotés d'un rayon d'action plus important.

5.3. Avions embarqués. — La plupart des intercepteurs sont conçus avec des versions « navales », pour être embarqués sur des porte-avions ; le décollage s'effectue au moyen d'une catapulte, installée sous le pont d'envol, et l'atterrissage est freiné à l'aide d'une crosse par accrochage d'une série de câbles, tendus transversalement sur une autre partie du même pont. Les extrémités de leurs ailes sont repliables afin de pouvoir passer au gabarit de l'ascenseur du porte-avion.

En général, ces versions navales sont mal adaptées aux missions demandées, et les dirigeants de la marine préfèrent des avions spécialement conçus dans ce but (Crusader, Grumman, F-14, etc.).

5.4. Avions cargos militaires. — Ils sont utilisés pour transporter rapidement des troupes et du matériel militaire loin du territoire national. Les véhicules motorisés sont introduits dans l'intérieur du fuselage transformé entièrement en soute au moyen de rampes inclinées (elles sont incorporées à la partie arrière de ces fuselages). Un aménagement spécial permet le transport des troupes, et leurs éventuels parachutages au point désiré. Ces avions sont évidemment de très grandes dimensions.

Principales caractéristiques de quelques avions militaires groupés suivant la forme de leurs ailes

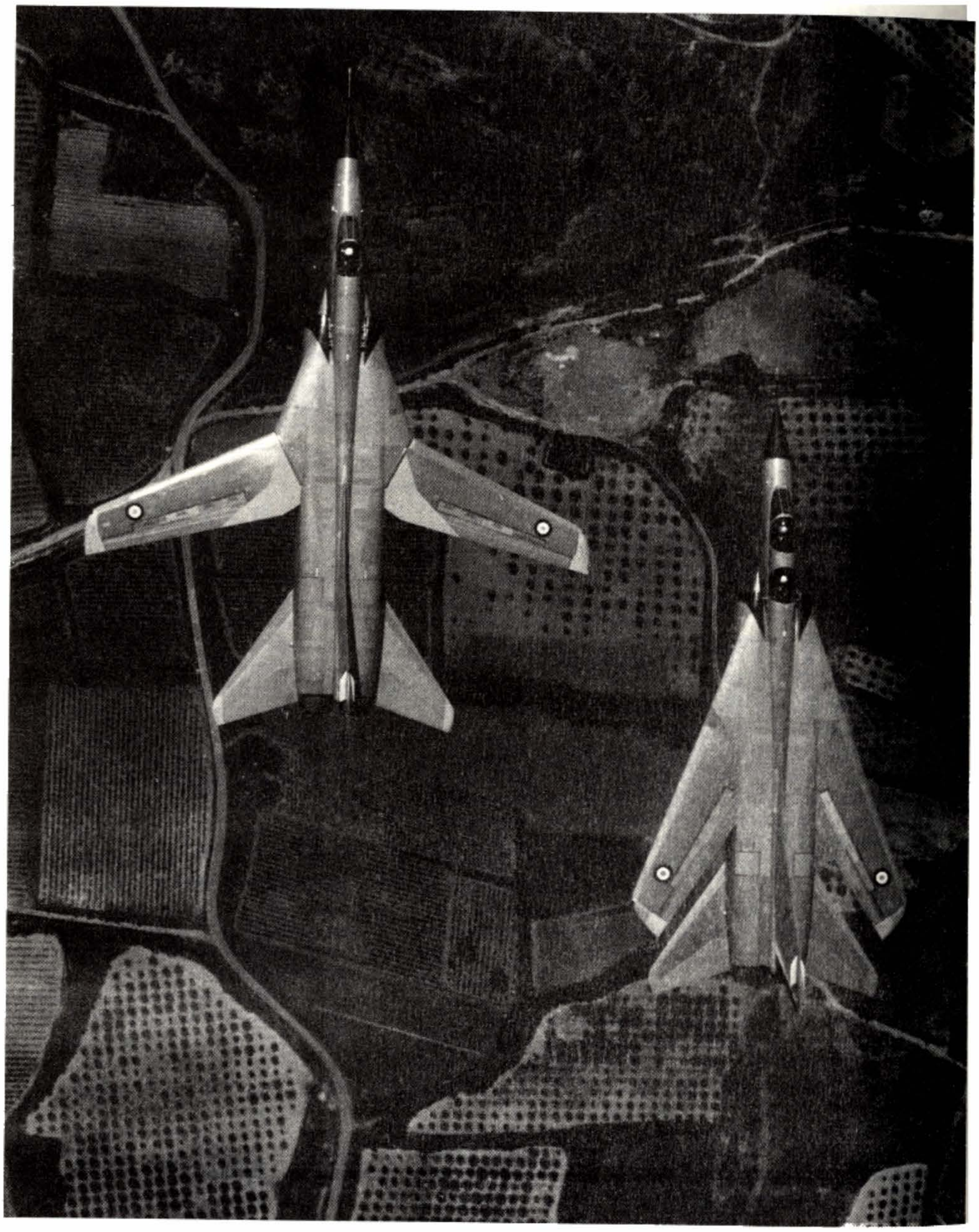
Type d'ailes	En flèche				En delta sans empennage	En delta avec empennage	À géométrie variable		À décollage court STOL
Constructeur	B.A.C.-Dassault	Mikoyan	McDonnell	Dassault	Dassault	Saab	Grumman	Dassault	Hawker
Avion	Jaguar	MIG-25	Phantom II	Mirage F.1	Mirage III C	AJ. 37	F-14	Mirage G	Harrier
Équipage	1 (ou 2)	1	2 (ou 1)	1	1 (ou 2)	1 (ou 2)	2	2	1 (ou 2)
Envergure (m)	8,45	12	11,70	8,40	8,22	10,60	19,5/10	13,00/7,00	7,70
Surface (m²)	24,00			25	34,00	45,00		25,00	18,70
Allongement	3,00			2,8	2,00	2,50		7,00/1,65	3,20
Flèche	40°		45°	50°	52°	44° et 63°	20°/69°	12°/64°	31°
Longueur (m)	15,50	21	17,70	15	13,80	16,30	18,90	16,80	13,90
Masse au décollage (tonnes)	10,5	25	20	11,4	11,8	16	29,5	15	10,3
Charge externe maximale (t)	4,5		7,25	4	4 (*)				2,5
Moteurs	2 Rolls-Royce Turbomeca « Adour »		2 General Electric J. 79	1 S.N.E.C.M.A. 9 K 50	1 S.N.E.C.M.A. « Atar » 9 B	1 Flyg-Motor RM 8 A	2 Pratt & Whitney TF. 30 P.	1 S.N.E.C.M.A. TF. 306	1 Rolls-Royce « Pegasus »
Poussée totale avec « réchauffe » (daN)	6 300	25 000	16 240	7 200	7 900 (**)	11 800	19 000	10 350	9 750
Charge alaire	440			455	350	355		600	550
Rapport de la poussée à la masse (daN/kg)	0,60		0,82	0,63	0,67	0,74		0,69	0,95
Vitesse maximale en altitude	Mach 1,6	Mach 3	Mach 2,0	Mach 2,2	Mach 2,15	Mach 2,0	Mach 2,0	Mach 2,2	Mach 1,25
Longueur du roulement au décollage (m)	580		460	550	600	400	215	400	50

(*) Version Mirage. (**) Avec une fusée « SEPR » d'appoint.

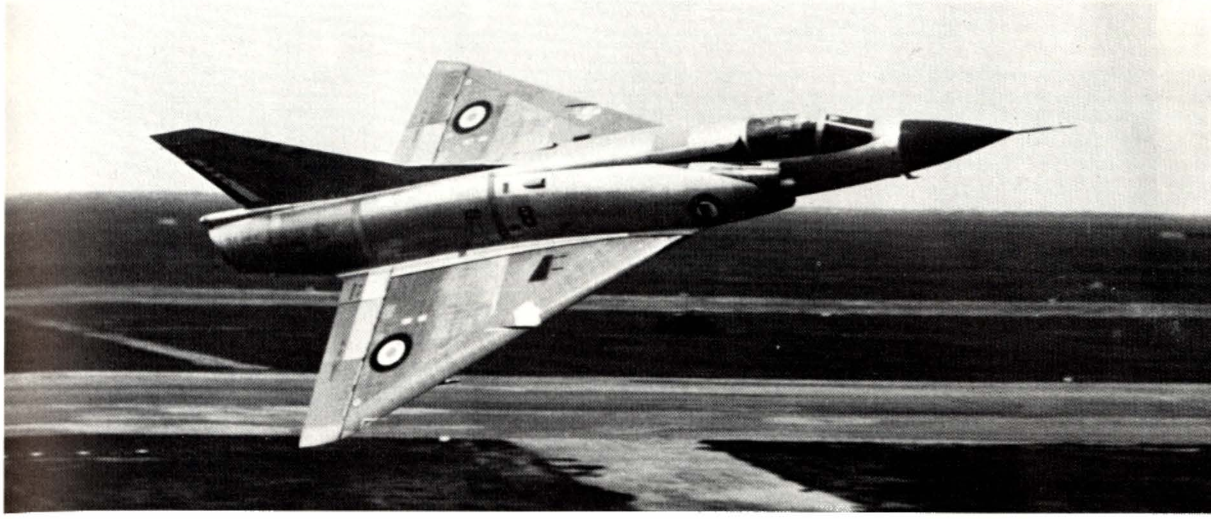


« Phantom II » est propulsé par 2 réacteurs J 79 General Electric. Poussée : 8 120 daN par réacteur (*McDonnell Douglas*)

Intercepteurs

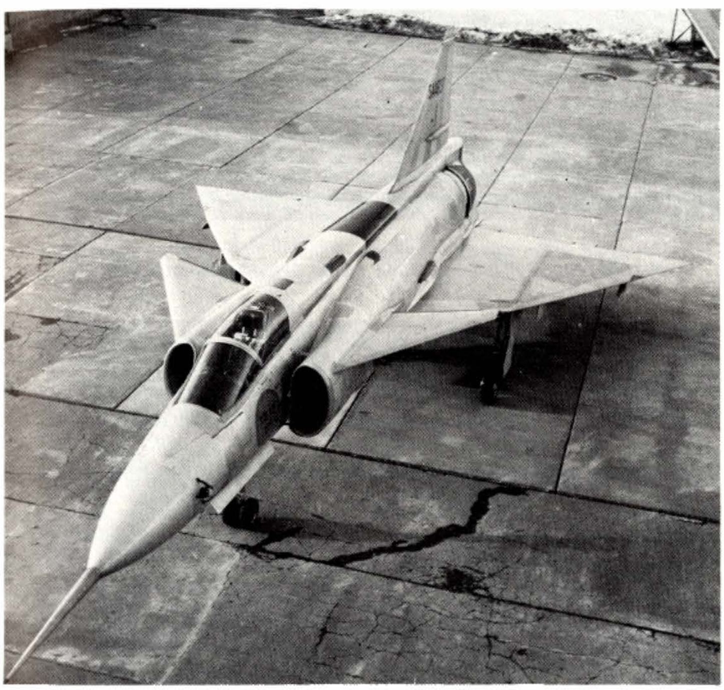


« Mirage G.8 » à géométrie variable est équipé de 2 réacteurs S.N.E.C.M.A. Atar 9 K 50. Poussée : 7 200 daN par réacteur (*Avions Marcel Dassault — Bréguet-Aviation*)

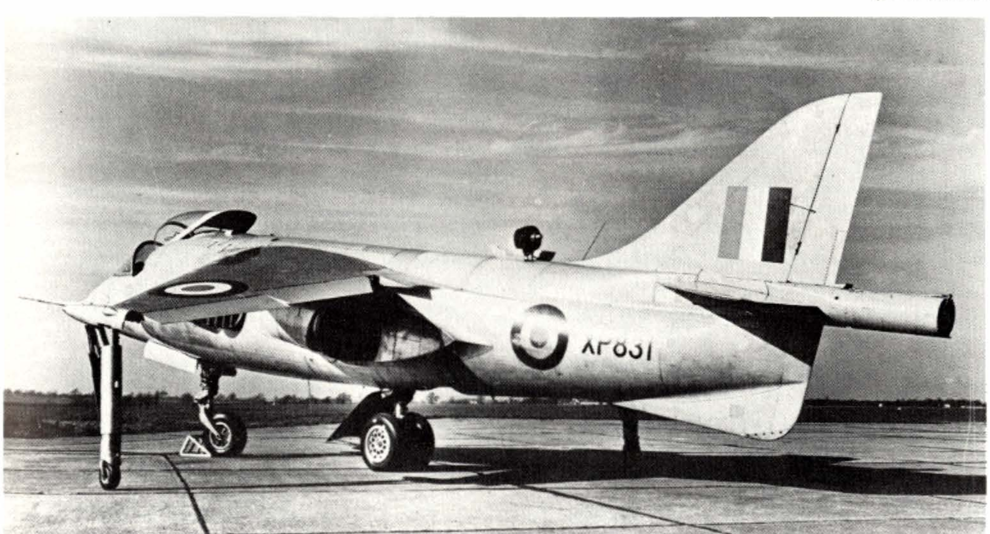


« Mirage III C », avion à aile basse en delta sans empennage. Il est propulsé par un réacteur S.N.E.C.M.A. « Atar 09 B » fournissant une poussée de 6 400 daN et par une fusée SEPR 841 qui permet d'obtenir une poussée supplémentaire de 1 500 daN pour accélérer l'appareil au combat (*Avions Marcel Dassault — Bréguet Aviation*)

Intercepteurs



« Saab-37 Viggen », avion d'attaque à aile en delta avec empennage avant (*Saab-Scania Aircraft*)



« Harrier » Hawker-Siddeley, avion à décollage vertical. Il est équipé d'un moteur Rolls-Royce « Pegasus ». Poussée : 9 750 daN (*Bristol Siddeley engines Ltd*)

Bombardiers



« Mirage IV A », avion supersonique stratégique, équipé de 2 réacteurs S.N.E.C.M.A. « Atar 09 K ». Poussée unitaire : 7 000 daN. Envergure : 11,85 m. Longueur : 23,50 m. Masse totale : 31 600 kg. Vitesse : Mach 2 à 11 000 m d'altitude (*Avions Marcel Dassault-Bréguet Aviation*)



« B 52 », propulsé par 8 réacteurs Pratt & Whitney suspendus par paires à l'aide de 4 pylônes placés sous les ailes. Poussée unitaire : 12 500 daN. La soute peut recevoir 84 bombes de 340 kg. Envergure : 56,39 m. Longueur : 48,03 m. Masse totale : 218 000 kg. Vitesse : 1 000 km/h à 12 000 m d'altitude (*Boeing*)

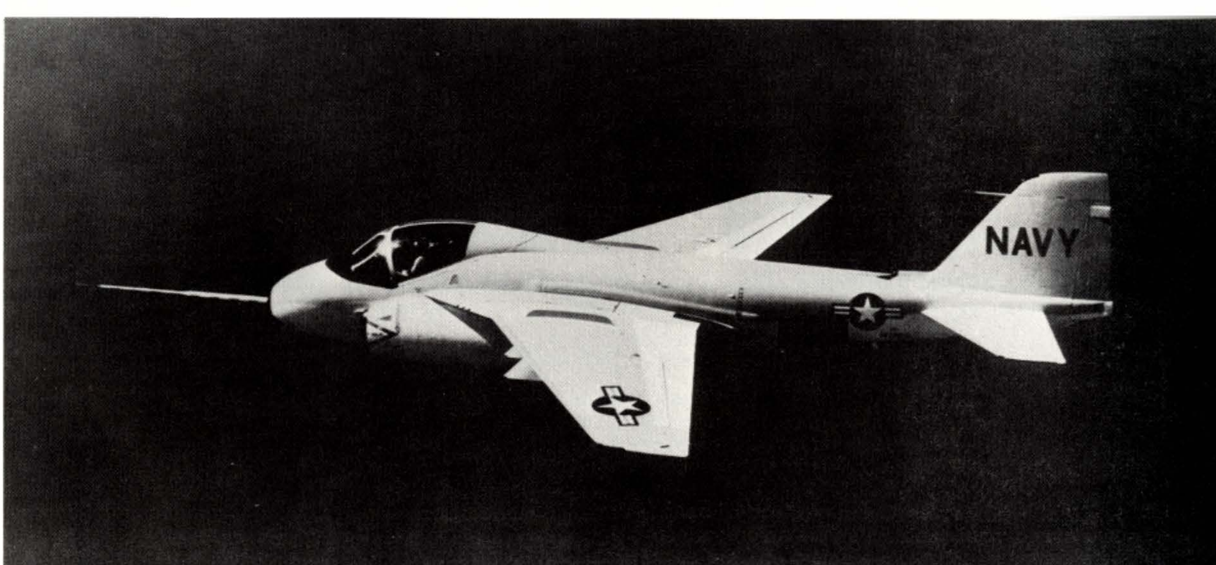


Maquette du B 1A. Bombardier stratégique de la North American Rockwell propulsé par 4 réacteurs General Electric F-101. Poussée unitaire : 13 600 daN. Aile à géométrie variable. Envergure : 41,6 /23,8 m. Longueur : 45,8 m. Masse maximale au décollage : 175 000 kg. Vitesse : Mach 2 (*Air et Cosmos*)

Avions embarqués



« F-14 Tomcat » à aile à géométrie variable, propulsé par 2 réacteurs Pratt & Whitney TF 30-P-412 A de 9 500 daN. Il est équipé de 6 missiles Phœnix. Vitesse : Mach 2 (*CEDOCAR*)



Grumman A2 F-1 Intruder, propulsé par 2 réacteurs Pratt & Whitney J 52-P-8A de 4 250 daN. Vitesse : 1 050 km/h (*USIS*)

CHAPITRE VI

ÉQUIPEMENT ET AMÉNAGEMENT DES AVIONS

INSTRUMENTS DE BORD

1. GÉNÉRALITÉS

La conduite d'un aéronef, avec ou sans visibilité extérieure, s'effectue à partir d'informations données par des instruments de bord et présentées à l'équipage sous différentes formes :

— Indicateurs circulaires à cadran et aiguille, de principe classique.
— Indicateurs numériques à chiffres.
— Indicateurs à échelle rectiligne genre « thermomètre ».
— Indicateurs figuratifs de références extérieures fictives (horizon, par exemple) ou d'organes de l'aéronef.
— Systèmes à projection sur le pare-brise dont la lecture peut être effectuée par le pilote sans quitter l'observation de l'extérieur.

Les indicateurs sont :

— soit à entraînement direct, mécanique ou électrique
— soit asservis : un moteur commandé par un amplificateur entraîne alors d'une part le mécanisme d'indication, et d'autre part un dispositif de contrôle de position (retour d'asservissement).
— soit à présentation par dispositifs lumineux généralement numériques,
— soit à présentation sur tubes cathodiques.

L'organe sensible ou capteur est situé :

— soit dans le même boîtier que le mécanisme d'indication,
— soit à distance, la liaison avec l'indicateur étant électrique, mécanique ou nécessitant un fluide (air ou liquide).

Les informations issues de plusieurs capteurs sont parfois centralisées et traitées dans des ensembles électroniques complexes afin que l'indication fournie au pilote soit immédiatement utilisable avec un minimum d'interprétation.

L'instrumentation de bord d'un aéronef moderne est très complexe. Les progrès de l'électronique ont beaucoup contribué à l'évolution très rapide des matériels mis à la disposition de l'équipage.

Quelques exemples : Les figurations nouvelles les plus rencontrées sont :

— Échelles rectilignes dont le déplacement peut être soit horizontal, soit vertical.
— Présentation sous forme d'un nombre comportant plusieurs chiffres, souvent complété par une indication de forme traditionnelle constituée par une aiguille qui se déplace devant des graduations.

Les instruments à échelle rectiligne sont utilisés pour regrouper certaines informations de manière fonctionnelle et pour présenter des paramètres de vol dont l'indication se prête bien à la nature du phénomène représenté (comme par exemple le variomètre dont le sens de déplacement vers le haut traduit un mouvement de l'avion dans le plan vertical). Leur utilisation convient bien pour la représentation d'informations correspondant à des paramètres liés à la conduite des moteurs. Pour les avions multimoteurs, un regroupement par type de paramètres permet la comparaison rapide des éléments entre eux. Par exemple, quatre échelles côte à côte représentent les températures d'huile de chacun des quatre moteurs (fig. VI-1). Dès qu'une anomalie se produit, la différence entre les valeurs devient très apparente. Des alarmes, par lampes rouges, annoncent qu'une valeur anormale est dépassée (voyants au bas de l'indicateur de pression ; fig. VI-2).

Les instruments à figuration numérique permettent l'indication des valeurs avec une grande précision. En ce

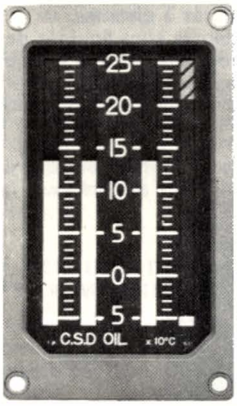


Fig. VI-1

(*Jaeger*)

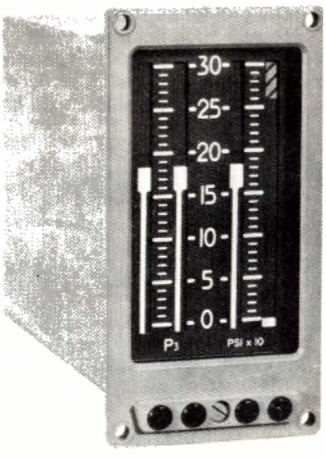


Fig. VI-2 (*Jaeger*)

qui concerne l'indication, la précision est fonction du nombre de chiffres présentés. Cette formule est très appréciable pour représenter les paramètres qui ne varient que très lentement : température, vitesse, temps, etc.

Lorsque les variations du paramètre sont importantes, la lecture du dernier chiffre est difficile et il devient nécessaire de compléter l'indication chiffrée par un dispositif classique à aiguille et cadran gradué.

Par ailleurs, une information chiffrée doit être lue et interprétée avant qu'il ne soit possible d'en détecter le sens de variation : la présentation aiguille-cadran donne le sens directement.

Les informations numériques sont représentées :

— par des tambours décimaux entraînés par un mécanisme asservi électriquement à un traducteur. Ce traducteur transforme le paramètre à mesurer en une information électrique, (altimètre codeur, V. fig. VI-3 a et b) ;
— par des tambours électromagnétiques à dix positions, indépendants mécaniquement et commandés par un dispo-

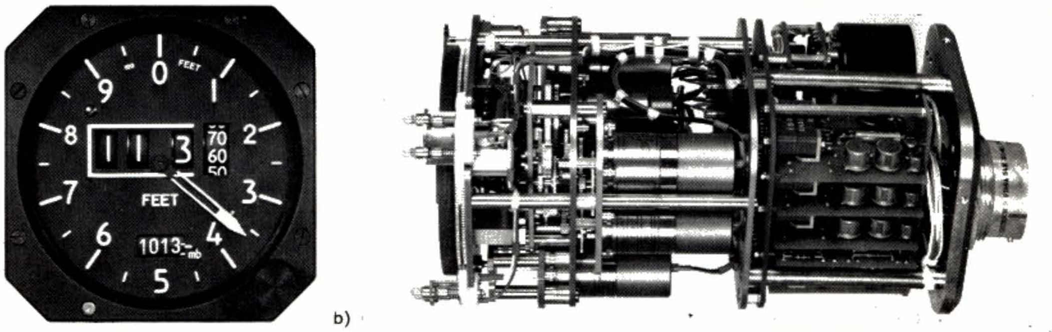


Fig. VI-3 a et b

Altimètre codeur (*Jaeger*)

sitif électronique numérique (indicateur de vitesse TAS = *True Airspeed*; fig. VI-4);

— par des afficheurs lumineux éclairés par des lampes à incandescence ou des afficheurs électroluminescents.

Une version mixte analogique-numérique d'un instrument peut être représentée par le machmètre (fig. VI-5)



Fig. VI-4

Indicateur de vitesse L'indication est faite en nœuds (1 nœud = 1 kt = 1 852 m/h) (*Jaeger*)

qui comporte un indicateur numérique à tambours électromagnétiques actionnés par un circuit électronique digital et un asservissement électromécanique classique entraînant l'aiguille. Les informations électriques correspondantes proviennent de traducteurs situés à distance.

Presque tous les instruments modernes sont équipés de dispositifs d'éclairage très étudiés pour assurer une bonne visibilité en vol de nuit. Ces éclairages sont alimentés généralement en basse tension de valeur maximale 5 volts, ou



Fig. VI-5

Machmètre (*Jaeger*)

parfois 28 volts, réglable par une commande générale pour tous les instruments et mise à la disposition du pilote.

Les verres sont traités « antireflets ». Bon nombre des instruments de bord modernes comportent des inscriptions anglosaxonnes, même pour des équipements produits en France, pour des avions français, l'anglais étant pratiquement international en aéronautique.

De nouvelles techniques font leur apparition: les tubes cathodiques se rencontrent plus fréquemment dans les cabines de pilotage. Ils permettent la présentation de nombreuses informations et un changement rapide des types d'indications représentées qui peuvent être modifiées au gré du pilote en fonction des phases de vol.

Les avions futurs seront munis d'instruments ayant un minimum de pièces en mouvement et seront reliés à un ou plusieurs calculateurs centraux par un nombre réduit de câbles: un « dialogue » sous forme codée pourra être établi entre les diverses unités de calcul et d'indication, afin de permettre à l'équipage de disposer d'informations de plus en plus nombreuses qui, après traitement et synthèse, faciliteront la conduite de l'avion tout en augmentant la sécurité du vol.

2. MESURE DE L'ALTITUDE

On utilise l'altimètre et la sonde radio-altimétrique.

2.1. Principe. — L'altitude d'un aéronef est la distance verticale qui le sépare d'une référence arbitraire prise pour altitude zéro. Cette référence est soit le niveau moyen du sol, soit le niveau moyen de la mer, soit une référence conventionnelle. L'altitude est généralement déduite d'une mesure de la pression barométrique ou *pression statique* P_s qui règne au niveau de l'aéronef.

Une loi conventionnelle appelée *atmosphère type* lie la pression statique à l'altitude. Cette loi permet la définition du mécanisme d'un instrument, l'altimètre, gradué directement en mètres (ou en pieds) mais qui, en fait, mesure la pression statique.

La pression statique réelle dépend d'un certain nombre de facteurs liés aux caractéristiques physiques de la masse d'air dans laquelle évolue l'avion, d'où une erreur de non conformité sur l'altitude.

Par ailleurs, la mesure de la pression statique effectuée à bord est perturbée par le déplacement de l'aéronef et par la position de la prise de pression sur cet aéronef, ce qui provoque un écart dit écart de statique. Cet écart dépend des paramètres de vol de l'avion; il peut être presque totalement corrigé dans certains altimètres.

Deux aéronefs passant, à la même vitesse, en un même point, en des instants très rapprochés seraient soumis à la même erreur de non conformité de la loi de variation de pression avec l'altitude. Seuls les écarts dus à leur installation propre provoqueraient des différences d'indication de leurs altimètres; cela permet d'assurer leur séparation verticale en toute sécurité, les règlements sur les espacements verticaux tenant compte des erreurs possibles des installations de bord. Cette séparation ne peut se réaliser en toute sécurité que si la référence prise pour l'altitude 0 est la même pour tous les avions.

Sauf pour les phases de décollage, d'atterrissage, ou pour le vol en basse altitude (inférieure à 900 m), les aéronefs doivent tous utiliser la même référence qui correspond à un calage unique de leurs altimètres: l'altitude 0 correspond à la pression 1 013,25 mbar qui est le point d'origine théorique de l'atmosphère type. Les altitudes sont alors données en *niveaux de vol*, ce qui implique que le pilote a bien effectué le réglage 1 013,25 mbar. Les niveaux de vol sont donnés par un chiffre qui correspond au centième de l'altitude lue en pieds (*feet*). Exemple: le niveau 400 correspond à une altitude de 40 000 ft, soit environ à 12 000 m.

2.2. L'altimètre. — L'altimètre est un baromètre spécial dont l'élément sensible est une capsule anéroïde vide d'air. Lorsque la pression extérieure varie, la capsule se déforme. Les déformations sont transmises à une ou plusieurs aiguilles qui se déplacent devant un cadran gradué en mètres ou en pieds (fig. VI-6).

Ces instruments sont dotés de mécanismes de très haute précision qui réalisent la transformation pression-altitude.

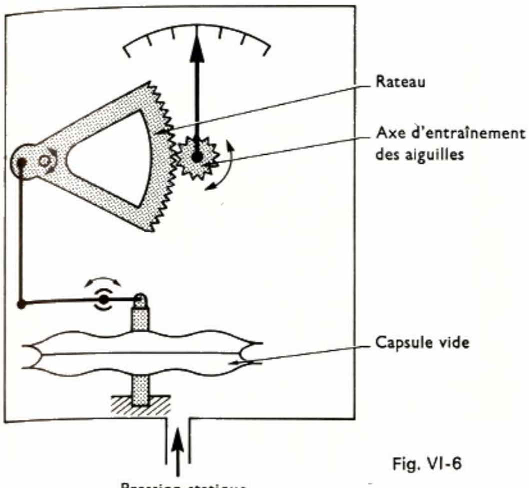


Fig. VI-6
Principe de base de l'altimètre

Un bouton de recalage barométrique permet au pilote le changement de référence par affichage d'une pression correspondant généralement à l'altitude indiquée 0. La valeur de cette pression apparaît dans une petite fenêtre ouverte dans le cadran (fig. VI-7).



Fig. VI-7
Altimètre (*Jaeger*)

Les avions sont en outre équipés d'altimètres codeurs qui, en plus de l'altitude indiquée au pilote, élaborent une information codée transmise par radio aux organismes de contrôle de la circulation aérienne.

Le code utilisé est de forme spéciale dite « Gillham ». Il représente l'information chiffrée donnant la valeur du niveau de vol de l'avion, ce qui permet aux contrôleurs au sol d'assurer la sécurité de séparation verticale du trafic. Ces altimètres sont généralement de type « asservis » électromécaniquement.

2.3. Sonde radio-altimétrique. — Pour de faibles distances verticales, la hauteur réelle peut être mesurée par des moyens radio-électriques qui ne dépendent pas de l'atmosphère mais de la distance aéronef-sol. Cette hauteur est très utile pour le vol à basse altitude et pour l'atterrissage.

La sonde envoie vers le sol un signal radioélectrique qui est ensuite réfléchi. Le temps mis par ce signal pour se propager sur le trajet aéronef-sol-aéronef est proportionnel à la distance à mesurer. Une aiguille, dont la déviation est proportionnelle au temps mesuré, se déplace face à un cadran gradué directement en mètres ou en pieds.

3. MESURE DE LA VITESSE ASCENSIONNELLE — LE VARIOMÈTRE

Cet instrument indique la vitesse verticale par la mesure des variations de la pression statique.

La pression statique est admise à l'intérieur et à l'extérieur d'une capsule anéroïde par l'intermédiaire de deux circuits différents : l'une des admissions se fait directement, l'autre par l'intermédiaire d'une canalisation de très faible section (capillaire) et d'un réservoir thermorégularisé. Le réservoir est souvent remplacé par le boîtier de l'instrument. Les corrections de température et de masse volumique de l'air sont alors obtenues au moyen de dispositifs annexes à fuite variable.

Lorsque l'altitude de l'aéronef est stable, la pression statique ne varie pas, les pressions de part et d'autre de la capsule sont identiques.

Lorsque l'altitude varie, la pression statique varie. Le côté de capsule (l'extérieur) qui communique directement avec l'ambiance est immédiatement soumis à la nouvelle pression tandis que l'autre n'y sera soumis qu'après un retard dû au temps nécessaire à l'entrée ou à la sortie

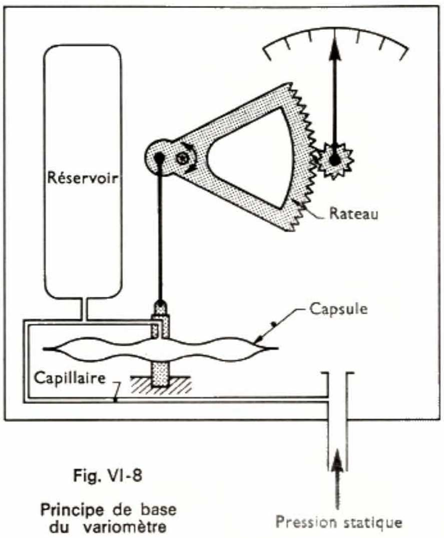


Fig. VI-8
Principe de base du variomètre

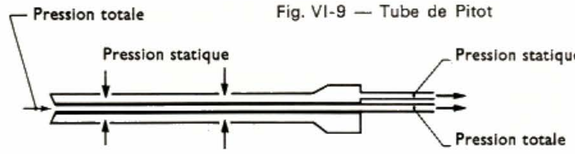
d'une certaine quantité d'air. Le retard est dû à l'écoulement lent de l'air par le capillaire et à la quantité d'air importante enmagasinée dans le réservoir. Cela provoque une différence de pression entre les deux côtés de la capsule d'où une déformation transmise à une aiguille qui se déplace devant un cadran gradué en mètres par seconde, en hectomètres par minute ou en pieds par minute (fig. VI-8).

4. MESURE DE LA VITESSE — L'ANÉMOMÈTRE ET LE MACHMÈTRE

4.1. Principe. — En vol, le comportement d'un aéronef (avion en particulier) dépend essentiellement de sa vitesse par rapport à la masse d'air qui en assure la sustentation.

Une *antenne anémométrique,* ou *tube de Pitot,* située à l'extérieur, comporte, d'une part, un orifice soumis directement à la pression dite totale P_t provoquée par le vent relatif dû à la vitesse et, d'autre part, un orifice dont le plan est parallèle au vent relatif et simplement soumis à la pression statique P_s, donc pratiquement non influencé par la vitesse. La différence de pression $\Delta p = P_t - P_s$ entre ces deux orifices, ou pression dynamique, est fonction de la vitesse de l'avion (fig. VI-9). Pour les basses vitesses (inférieures à 300 km/h) et aux basses altitudes, cette vitesse indiquée est très proche de la vitesse réelle de l'aéronef par rapport à la masse d'air. Des corrections sont à apporter, en altitude, pour obtenir la vitesse réelle. La vitesse indiquée est un paramètre fondamental pour le pilotage proprement dit car le comportement aérodynamique de l'avion lui est lié.

Fig. VI-9 — Tube de Pitot



La navigation s'effectue à partir de la vitesse de l'avion par rapport au sol. Pour obtenir cette *vitesse-sol* il faut :

— mesurer la vitesse réelle ou vitesse propre de l'avion par rapport à la masse d'air ;

— tenir compte du déplacement propre de la masse d'air dans laquelle l'aéronef évolue, donc de la vitesse du vent et de sa direction par rapport à la direction de l'aéronef.

La composition géométrique de la vitesse propre et de la vitesse du vent donne la vitesse-sol (on rappelle que l'angle que fait la vitesse-sol avec la vitesse propre s'appelle la dérive).

La vitesse propre peut s'obtenir de différentes manières dont les plus classiques sont :

— *Calcul de la vitesse propre à partir de l'indication de l'anémomètre.* — Ce calcul est effectué à l'aide d'une règle à calcul spéciale, ou *computer*, qui permet de tenir compte de la valeur de la pression statique et de la température extérieure. Certains aéronefs sont équipés de calculateurs automatiques qui donnent directement cette vitesse au pilote.

— *Calcul de la vitesse propre à partir de l'indication du machmètre.* — Le *nombre de Mach* d'un aéronef est le quotient de la vitesse propre et de la vitesse de propagation du son dans la masse d'air ambiante.

4.2. L'anémomètre. — Une capsule différentielle est soumise à la pression totale P_t. Le boîtier qui la contient est soumis à la pression statique P_s. Le déplacement des membranes de la capsule est fonction de la différence $P_t - P_s$ et un mécanisme transforme ce mouvement en une rotation d'aiguille face à un cadran gradué en « vitesse indiquée » (V.I.). La graduation n'est pas linéaire (fig. VI-10).

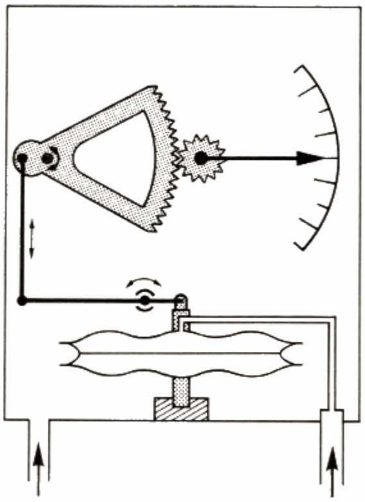


Fig. VI-10

Principe de base de l'anémomètre

4.3. Le machmètre. — Il existe, en subsonique et en supersonique, des relations de base qui lient le nombre de Mach M aux mesures des pressions totale P_t et statique P_s, et en particulier au quotient de leur différence $\Delta p = P_t - P_s$ dite « pression dynamique » utilisée dans l'anémomètre, et de la pression statique P_s utilisée dans l'altimètre.

Le machmètre comporte deux capsules : l'une de mesure de pression dynamique, l'autre de mesure de pression statique. Un mécanisme permet d'obtenir le quotient $\frac{P_t - P_s}{P_s}$ de ces pressions et de transformer le mouvement suivant la loi correspondante. Il entraîne une aiguille face à un cadran gradué en nombres de Mach, la valeur 1 correspondant à la vitesse du son.

4.4. L'anémomètre-machmètre (fig. VI-11). — Cet instrument combiné assure les deux fonctions : l'ensemble anémométrique, de même principe que l'anémomètre, est complété par une capsule sensible à la pression statique qui entraîne un cadran mobile intérieur. L'ensemble fonctionne suivant le même principe qu'une règle à calcul circulaire. L'aiguille, liée à l'ensemble anémométrique se déplace face à un cadran fixe gradué en vitesses, tandis qu'un cadran intérieur gradué en nombres de Mach se déplace en fonction de P_s. Les déplacements de l'aiguille et du cadran respectivement fonctions de $P_t - P_s$ et de P_s sont logarithmiques. Le rapport $\frac{P_t - P_s}{P_s}$ est alors obtenu automatiquement par soustraction et le cadran intérieur est gradué en nombres Mach.

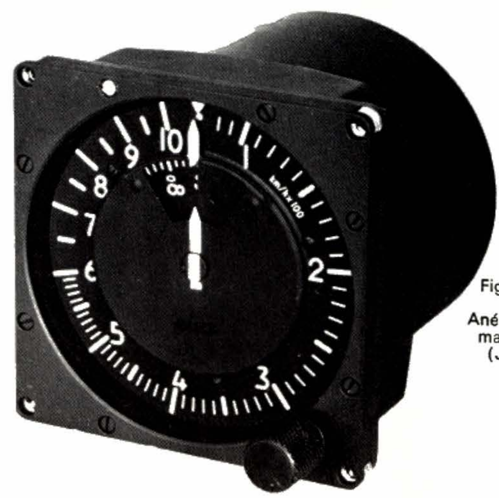


Fig. VI-11

Anémomètre-machmètre (*Jaeger*)

Face à l'aiguille, le pilote lit la vitesse indiquée sur le cadran extérieur et le nombre de Mach correspondant sur le cadran intérieur.

5. MESURES DE LA DIRECTION DE L'AÉRONEF PAR RAPPORT AU SOL

Ces mesures se font soit à l'aide du compas, soit à l'aide du compas gyroscopique.

5.1. Principe. — Lorsque la vitesse de l'aéronef par rapport au sol est connue il est nécessaire de définir sa direction par rapport aux axes de référence du globe que sont les méridiens et parallèles.

Outre les systèmes calculateurs complexes à base de moyens inertiels, qui équipent certains avions modernes, et les moyens de radionavigation, tous les aéronefs sont munis de moyens classiques qui utilisent à la base la direction de l'aéronef par rapport à la direction du champ magnétique terrestre, suivant le principe de la boussole.

Le *cap* est la direction de l'aéronef par rapport aux pôles Nord : *cap magnétique* pour la direction vers le pôle Nord magnétique, *cap vrai* pour la direction vers le pôle Nord géographique.

L'écart de direction entre le cap magnétique et le cap vrai s'appelle la *déclinaison*.

5.2. Le compas. — Le compas est une boussole perfectionnée. Il est essentiellement constitué par un barreau aimanté portant une couronne graduée en degrés. L'ensemble est immergé dans un liquide qui supporte le mécanisme et amortit les mouvements d'oscillation de l'équipage mobile.

Les champs magnétiques perturbateurs dus aux masses et aux circuits électriques placés à proximité du compas provoquent des déviations parasites. Des aimants auxiliaires, les compensateurs, permettent de diminuer ces défauts. Après compensation, il reste une erreur résiduelle, appelée déviation, qui est mesurée et traduite sous forme d'une courbe de compensation.

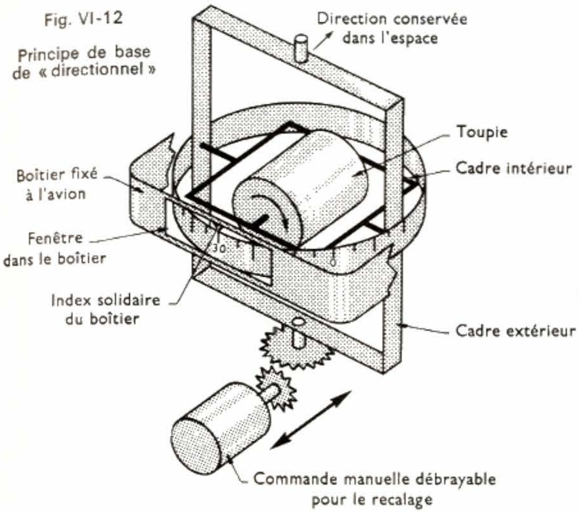
Afin d'éviter la proximité d'éléments magnétiques parasites, nombreux dans le poste d'équipage, un compas est placé en extrémité d'aile ou de fuselage. La couronne graduée est remplacée par un transmetteur électrique. Un

indicateur répétiteur situé dans la cabine fournit l'information de cap au pilote.

5.3. Maintien du cap par un gyroscope. — Un gyroscope est essentiellement constitué par une masse, constituant la toupie, entraînée en rotation à grande vitesse autour d'un axe. Ce dispositif a la propriété de garder une direction fixe dans l'espace, s'il est abandonné à l'état libre.

Le « directionnel », ou « conservateur de cap ». — Un gyroscope dont l'axe est horizontal est placé dans un cadre libre de tourner autour d'un axe vertical. L'ensemble est placé dans un boîtier fixé à l'avion (fig. VI-12).

Fig. VI-12
Principe de base de « directionnel »



À tout changement de direction de l'avion correspond un déplacement angulaire du boîtier autour du gyroscope et de son cadre qui porte une couronne graduée en degrés. On y lit le cap face à un index solidaire du boîtier, à condition que le pilote ait initialement calé le gyroscope en direction du Nord par une commande de *recalage* mise à sa disposition (V. fig. VI-1).

Par suite de la rotation de la Terre et de certaines imperfections du gyroscope, celui-ci ne maintient pas sa direction fixe vers le Nord : il *précessionne*.

En cours de vol, le pilote *recale* le gyroscope de temps à autre par observation du compas lorsque l'aéronef est stable en direction.

Souvent, le compas comporte un transmetteur électrique qui recale automatiquement le gyroscope, lequel « fait » donc la moyenne des informations fluctuantes qui lui sont transmises. Cet ensemble qui s'appelle *centrale de cap* ou *compas gyroscopique* donne une indication stable sous l'action du gyroscope, et dépourvue de dérive grâce au compas.

6. MESURE D'ÉLÉMENTS DU VIRAGE. L'INDICATEUR DE VIRAGE ET LA BILLE

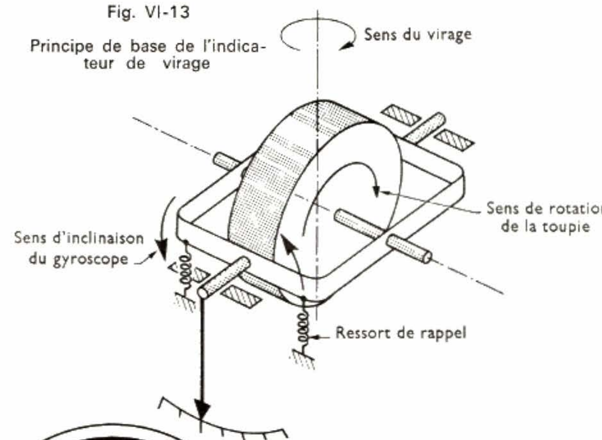
Le *taux de virage* est la vitesse angulaire du changement de direction de l'aéronef.

Le principe de l'indicateur repose sur l'effet de précession du gyroscope à axe horizontal qui s'incline dans un sens perpendiculaire à cet axe si une action extérieure le force à changer de direction. La force qui provoque l'inclinaison est fonction de la vitesse de rotation de la toupie du gyroscope et de la vitesse angulaire du changement de direction imposé par le virage. Des ressorts de rappel équilibrent ce couple (fig. VI-13).

À un taux de virage déterminé correspond une inclinaison du gyroscope sur le cadre duquel est fixée une aiguille qui se déplace face à un cadran où sont repérées les valeurs des taux de virage usuels (fig. VI-14 a).

Complément à l'indicateur de virage : *la bille* (fig. VI-14 b). Sur le même indicateur est habituellement monté un niveau transversal composé d'un tube de verre incurvé (élément de tore), rempli de liquide amortisseur, et dans lequel se déplace une bille. Cette bille, qui indique le dérapage de l'avion, doit se trouver au milieu, dans la

Fig. VI-13
Principe de base de l'indicateur de virage



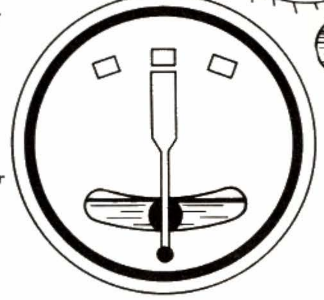


Fig. VI-14 a
Indicateur de virage

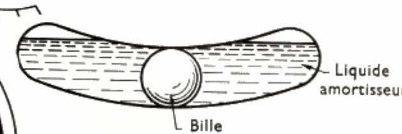


Fig. VI-14 b — Détail de la bille d'un indicateur de virage

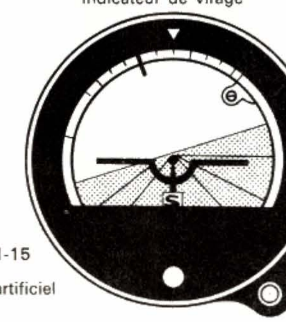


Fig. VI-15
Horizon artificiel

partie basse du tube lors d'un vol horizontal normal, ou lors d'un virage correctement effectué. Elle permet au pilote de doser correctement, en particulier lors des virages, les actions conjuguées des commandes de direction (palonnier) et des commandes de gauchissement (manche).

7. MESURE DE L'ATTITUDE DE L'AVION. L'HORIZON ARTIFICIEL

L'horizon gyroscopique, ou *horizon artificiel* (fig. VI-15), est un instrument essentiel pour le vol sans visibilité.

Il restitue au pilote la référence horizontale de l'horizon réel qui permet le contrôle de la position de l'aéronef autour de son centre de gravité.

Il est constitué par un gyroscope dont l'axe de la toupie est maintenu vertical par un dispositif annexe dit *érecteur*.

Un dispositif à deux cadres montés *à la cardan* supporte le gyroscope. Les mouvements *d'assiette longitudinale* (piqué-cabré) et *d'assiette transversale* (inclinaison) sont donnés par les mouvements de ces cadres par rapport au boîtier.

Les mouvements des cadres sont figurés sur la face avant de l'instrument par le déplacement d'une barre représentant l'horizon. De plus, un index qui se déplace devant des graduations donne la valeur angulaire de l'inclinaison. Le déplacement de la barre d'horizon devant une maquette fixe représentant un avion visualise les mouvements de l'avion par rapport à l'horizon réel.

8. INSTRUMENTS DE CONTRÔLE DES MOTEURS

8.1. Contrôle des vitesses de rotation. — Le tachymètre, entraîné directement par une prise de mouvement mécanique ou par l'intermédiaire d'un transmetteur électrique, donne la vitesse de rotation de l'organe en mouvement.

Cet équipement comporte, soit une seule aiguille, soit deux aiguilles concentriques (fig. VI-16 a), soit une aiguille centrale et une trotteuse située sur le côté du cadran (fig. VI-16 b).

8.1.1. Tachymètres chronométriques. — La prise de mouvement au moteur est généralement faite après un réducteur, par une transmission à flexible.

Dans le tachymètre, un mouvement d'horlogerie, remonté par la prise de mouvement, fait tourner à vitesse constante un arbre qui supporte des cames. Ces cames embrayent, pendant un temps défini, voisin d'une seconde, un mécanisme qui tourne à la vitesse de la prise de mouvement. Le déplacement maximal de ce mécanisme est proportionnel à la vitesse à mesurer : l'aiguille en suit les valeurs maximales à chaque cycle par l'intermédiaire d'un dispositif qui la rend solidaire du mouvement à l'instant opportun.

Fig. VI-16 a

Tachymètre (*Jaeger*)



8.1.2. Tachymètres à générateur. — Sur les aéronefs modernes, la liaison par flexible a été remplacée par une liaison électrique. Les principes des mesures sont les suivants :

— Une *génératrice* dont la tension de sortie est proportionnelle à la vitesse de rotation est entraînée par le moteur. L'indicateur est un voltmètre dont le cadran est gradué en tours par minute.

— *Tachymètre triphasé synchrone*. Un alternateur triphasé, ou transmetteur, est entraîné par le moteur. Les tensions triphasées alimentent dans l'indicateur un moteur triphasé synchrone dont l'arbre tourne donc à la même vitesse que l'arbre d'entraînement de l'alternateur.

L'arbre du moteur porte un aimant dont le champ est refermé par un circuit magnétique. Cet aimant tourne à l'intérieur d'une cloche en métal non magnétique, ce qui tend à l'entraîner en rotation (induction de courants de Foucault). Le couple d'entraînement, proportionnel à la vitesse de rotation, est équilibré par un ressort spiral de mesure. Dans son mouvement, la cloche entraîne les aiguilles de l'indicateur.

Ce type de tachymètre est actuellement le plus utilisé. Il est robuste et précis (V. fig. VI-16 a et VI-16 b).

8.1.3. Tachymètre à impulsions. — Un rupteur coupe et rétablit un contact au rythme de la rotation du moteur. L'indicateur reçoit des impulsions électriques dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation.

L'indicateur est un fréquencemètre électrique ou électronique. Le rupteur est parfois remplacé par une *roue phonique* qui est un disque dentelé : le passage de chacune des dents devant un détecteur donne naissance à une impulsion.

8.2. Mesure des pressions. — La conduite d'un moteur nécessite la connaissance d'un certain nombre de pressions.

Le réglage de la puissance d'un moteur à pistons classique s'effectue essentiellement par le réglage de la pression d'admission des gaz, et de la vitesse du moteur contrôlée par le pas de l'hélice.

8.2.1. Indicateur de pression d'admission. — La *pression d'admission* est une pression absolue (par rapport au vide). L'indicateur est un baromètre constitué par une capsule à l'intérieur de laquelle le vide a été réalisé, et dont l'extérieur est soumis à la pression à mesurer.

Le déplacement des membranes de la capsule, proportionnel à la pression à mesurer, est transmis à l'aiguille de l'indicateur. Le cadran est gradué généralement en bars et aussi parfois en pièzes ou en pouces de mercure.

Lorsque le moteur est à l'arrêt, ce manomètre indique la valeur de la pression atmosphérique qui règne dans le circuit d'admission.

8.2.2. Indicateur de pression d'huile. — C'est un manomètre qui est généralement constitué par un *tube de Bourdon* c'est-à-dire un tube plat enroulé qui se déforme en fonction de la pression. Un mécanisme relie l'extrémité du tube à une aiguille qui se déplace devant un cadran gradué en pressions.



Fig. VI-16 b — Tachymètre (*Jaeger*)



Fig. VI-17 — Indicateur double de température (*Jaeger*)

Les deux instruments décrits ci-dessus sont à entraînement direct de l'aiguille. Dans les équipements modernes la capsule, ou le tube de Bourdon, ou tout autre organe sensible, entraîne un détecteur qui transforme le mouvement ou la force en un signal transmis vers le poste d'équipage au moyen de canalisations électriques. L'indicateur, asservi ou non, est un répétiteur associé au transmetteur.

Les plus répandues de ces chaînes de mesures sont soit à base de potentiomètres alimentés par le courant continu de bord, soit à base de transmetteurs inductifs, qui sont des bobinages doubles alimentés sous la tension de bord de fréquence 400 Hz. Dans ces derniers, un noyau solidaire de la capsule modifie le couplage de deux bobinages en fonction de la pression.

Dans les deux cas, le récepteur est un logomètre ou quotientmètre dont l'indication est fonction du quotient de la tension de mesure et de la tension d'alimentation. Ce procédé élimine l'influence des variations de tension du réseau de bord.

8.3. Mesure des températures. — En dehors des thermomètres à tension de vapeur rarement utilisés sur les aéronefs actuels, la plupart des mesures de températures sont effectuées à l'aide de chaînes de mesures électriques basées sur les principes suivants :

1° *Variation d'une résistance avec la température.* — Une sonde de mesure comporte une résistance en platine ou en nickel. Cette résistance est placée dans un circuit à courant constant. Les variations de tension à ses bornes représentent les variations de résistance, dues aux variations de température de la *sonde*. L'indicateur est un voltmètre ou un instrument asservi de mesure de tensions, directement gradué en degrés.

Dans d'autres montages, la résistance constitue l'une des branches d'un *pont de Wheatstone* alimenté à tension constante. L'indicateur est alors un galvanomètre monté dans la branche médiane du pont.

Si le pont n'est pas alimenté à tension constante, l'indicateur est un *quotientmètre* dont la déviation est proportionnelle au quotient de la tension aux bornes de la résistance et de la tension d'alimentation du pont, ce qui élimine l'influence des variations de la tension du réseau de bord. Ces procédés sont utilisés pour la mesure des tempé-

ratures inférieures à 300 °C (températures d'huile, d'air, de circuits de refroidissement, etc.).

2° *Thermocouples*. — Pour la mesure des hautes températures, allant jusqu'à 800 °C, par exemple, pour les turbines de réacteurs, les instruments sont des *pyromètres* équipés de thermocouples.

Le courant mesuré dépend de la différence entre la f.é.m. d'une soudure chaude et la f.é.m. d'une soudure froide, laquelle dépend de la température ambiante. Il en est tenu compte dans les circuits par adjonction d'un *correcteur* qui mesure cette température ambiante et restitue une f.é.m. de correction.

La soudure chaude est placée dans une sonde montée sur l'élément à contrôler et la soudure froide est disposée dans le boîtier d'un microampèremètre gradué en degrés qui constitue l'indicateur (fig. VI-17).

Dans certains ensembles plus complexes, les f.é.m. sont amplifiées, corrigées, et le signal résultant est dirigé vers des calculateurs ou des indicateurs asservis.

8.4. Exemple d'instrument à fonctions et indications multiples. Indicateur à comparaison automatique (fig. VI-18). — Cet équipement est décrit à titre d'exemple afin de montrer l'évolution de l'instrumentation de bord pour la recherche d'une simplification de la tâche des équipages lorsque le nombre de paramètres à surveiller est très important.

L'indicateur à comparaison automatique (qui équipe les prototypes de l'avion Concorde) permet la surveillance de 36 paramètres de conduite des moteurs tout en n'en représentant que 9 à la fois. Son principe de fonctionnement sera décrit en supposant qu'un paramètre déterminé, par exemple la pression d'huile de chacun des moteurs, doit être surveillé.

L'avion possède 4 moteurs équipés chacun d'un capteur de pression qui transmet son information à l'indicateur. L'incident redouté est une diminution de la pression d'huile de l'un des réacteurs au-dessous d'une valeur limite définie (une valeur anormalement basse est un indice de mauvais fonctionnement). Les quatre signaux issus des transmetteurs sont transmis à l'indicateur. Si celui-ci se trouve en configuration « automatique » définie par l'enfoncement de la touche de commande « auto », les quatre signaux sont comparés entre eux, et c'est la valeur du signal correspondant à la pression d'huile la plus critique, ici la plus faible qui est indiquée. Par ailleurs, si la pression d'huile la plus faible est celle du moteur 2, le chiffre 2 apparaît sur un voyant. Si la valeur de cette pression est considérée comme normale, il n'est pas nécessaire de connaître les autres qui sont obligatoirement plus élevées et donc normales dans cet exemple; les quatre pressions sont ainsi surveillées simultanément.

Néanmoins, il est possible de connaître la valeur de la pression d'huile d'un autre moteur en appuyant sur une touche portant le numéro du réacteur correspondant.

De plus, dans l'indicateur, les valeurs des signaux sont continuellement comparées à des signaux fixes de telle manière que des circuits électroniques adaptés provoquent l'allumage de voyants situés à la partie supérieure de la face avant de l'instrument, ainsi que des voyants situés en différents endroits du poste de pilotage.

Si la pression d'un moteur baisse au-dessous de la valeur d'alarme, le voyant identifié correspondant s'allume. Les circuits des alarmes sont indépendants des circuits d'indication afin qu'une panne de l'un d'eux ne perturbe pas l'autre. Il existe une alarme par paramètre et par moteur, ce qui en permet la surveillance continuelle quelle que soit la configuration des circuits d'indication.

En cas d'incident, ou d'arrêt volontaire d'un moteur, le paramètre indiqué serait celui du réacteur arrêté, ce qui est inutile. Un commutateur permet d'éliminer à volonté de la comparaison les paramètres correspondant à ce moteur. La comparaison ne concerne plus alors que les autres moteurs.

L'indicateur de la figure VI-18 comporte neuf chaînes d'indications pour un quadrimoteur, ce qui permet la surveillance de 36 paramètres y compris les 36 alarmes. Il élabore en outre 36 signaux électriques destinés aux systèmes d'enregistrement en vol. Les signaux traités et représentés sont issus de capteurs très divers (capteurs de températures, de pressions, capteurs sensibles aux vibrations, etc.).

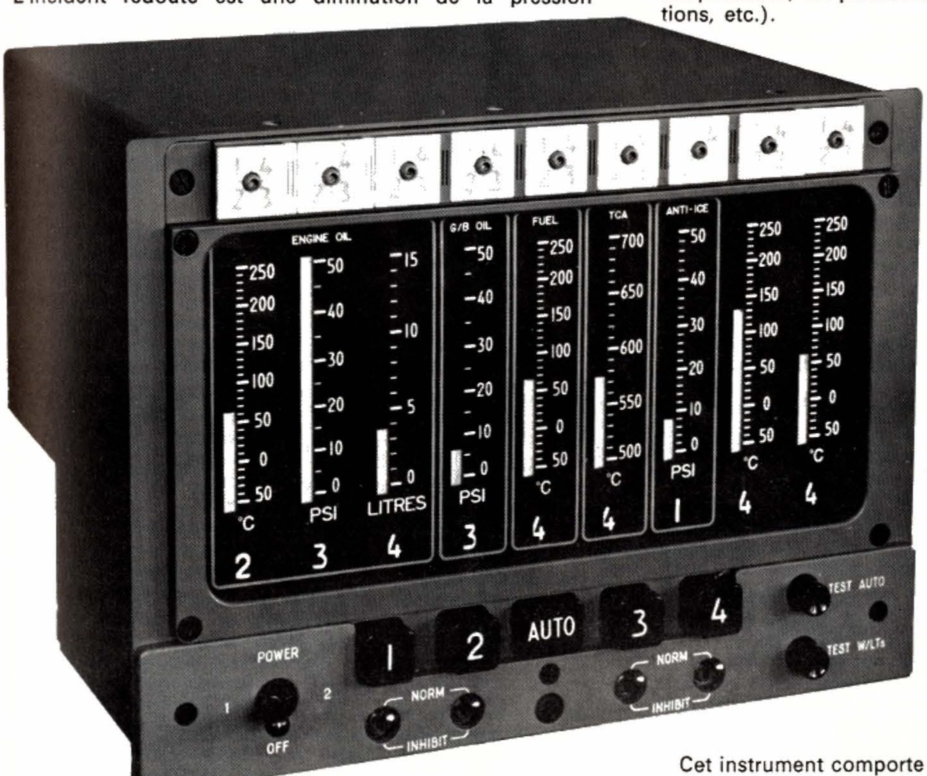


Fig. VI-18

Indicateur à comparaison automatique (*Jaeger*)

Cet instrument comporte tous les éléments nécessaires à son fonctionnement inclus dans un boîtier de faibles dimensions (la face avant mesure environ 180 mm de hauteur sur 250 mm de large) et sa masse est inférieure à 10 kg. Il remplace 36 indicateurs classiques et 36 alarmes.

Cet exemple relativement simple, de conception nouvelle, montre que les constructeurs d'avions et d'équipements sont préoccupés par les questions d'encombrement et de masse des équipements et aussi par l'aide à apporter à

l'équipage pour la surveillance des instruments pendant le vol en recherchant des solutions originales lorsque cela est possible. Néanmoins cette formule ne serait pas applicable à des paramètres principaux dont la surveillance est assurée individuellement et de manière permanente.

9. MESURE DE LA CONSOMMATION EN CARBURANT : JAUGEURS ET DÉBITMÈTRES

Les avions à moteurs à pistons sont parfois équipés d'indicateurs de débit de carburant mais leur consommation est plus souvent contrôlée par des jaugeurs qui indiquent le contenu des réservoirs.

Les avions à turbines ou réacteurs sont généralement équipés des deux systèmes. Le carburant restant ou consommé est évalué en volume ou en masse.

9.1. Les jaugeurs. — Les jaugeurs sont à flotteur ou à capacité variable.

Dans le premier cas, un flotteur entraîne un détecteur électrique (potentiomètre, par exemple) dont la position est indiquée par un répétiteur adapté, gradué en volumes ou en masses. Les graduations sont réalisées en fonction de la forme, souvent complexe, des réservoirs.

Le jaugeur à capacité variable est constitué par deux armatures plongées dans le carburant qui constitue le diélectrique dans la partie immergée. La capacité varie avec le niveau de liquide. L'indicateur est généralement constitué par un circuit oscillateur qui alimente un pont dont la capacité de mesure constitue l'une des branches. Un circuit détecteur et un galvanomètre ou un logomètre complètent l'instrument qui est gradué en litres.

9.2. Les débitmètres. — Les débitmètres mesurent le volume ou la masse de carburant fourni au moteur par unité de temps.

Le *débitmètre volumétrique* consiste en une turbine placée dans un corps intercalé dans la tuyauterie d'amenée du carburant au moteur. La vitesse de la turbine est proportionnelle au débit. Cette vitesse est généralement mesurée par un système de comptage : chaque passage de pale de la turbine provoque une variation d'induction dans un circuit magnétique ainsi que dans un bobinage porté par celui-ci. On obtient ainsi des impulsions électriques de fréquence proportionnelle au débit.

L'indicateur donne deux informations :

1° *Indication du débit volumétrique* qui est proportionnel à la fréquence des impulsions : un circuit électronique délivre un signal électrique proportionnel à la fréquence des impulsions qu'il reçoit (convertisseur fréquence-tension). Il alimente un indicateur, asservi ou non, gradué en volume par unité de temps (litres par heure en général).

2° *Totalisation des impulsions* et *indication chiffrée du volume consommé* (ou éventuellement du volume restant par soustraction à la quantité totale affichée au départ).

Dans certains débitmètres volumétriques, la rotation de la turbine est transformée en une tension triphasée qui, après amplification, alimente un indicateur gradué en débits et qui est semblable à un tachymètre triphasé synchrone.

Le *débitmètre massique* est parfois, de par son principe, directement sensible à la masse écoulée. Plus généralement, c'est un débitmètre volumétrique dont l'indication est corrigée par une mesure ou un affichage de la masse volumique du carburant (celle-ci varie avec la composition et la température du carburant).

Divers procédés sont utilisés pour effectuer la correction : la relation « capacité — masse volumique » de deux armatures entièrement immergées donne une bonne approximation. Un circuit électrique permet de mesurer la capacité et délivre un signal électrique à un circuit ou à un mécanisme conçu pour fournir un signal proportionnel au produit (débit en volume × masse volumique) c'est-à-dire au débit en masse de carburant. Le signal résultant est fourni à un dispositif d'indication qui donne alors des informations de débit massique.

10. INSTRUMENTS DE RADIONAVIGATION

Les aéronefs sont équipés de moyens de navigation plus ou moins élaborés en fonction de la mission pour laquelle ils ont été conçus : avions militaires, hélicoptères, avions des lignes commerciales régulières, avions de tourisme, etc. Des centrales à inertie, associées à des calculateurs, permettent de connaître leur position à tout moment. En complément à ces moyens complexes, ou plus simplement à titre d'équipements principaux, figurent des instruments classiques de radionavigation qui sont :

— Indicateur de V.O.R. (*Visual omni range*)
— Indicateur de radio-compas
— Indicateur I.L.S. (*Instrument landing system*)

10.1. Indicateur de V.O.R. (fig. VI-19). — L'indicateur de V.O.R. permet au pilote de connaître la route magnétique à suivre pour rejoindre une station émettrice choisie dont la position géographique, au sol, est bien définie. Les voies aériennes sont jalonnées par ces stations au sol. Elles émettent chacune sur une fréquence particulière dans la bande V.H.F. (*Very high frequency*). Les valeurs des fréquences affectées à ces dispositifs sont comprises entre 108 et 118 mégahertz.

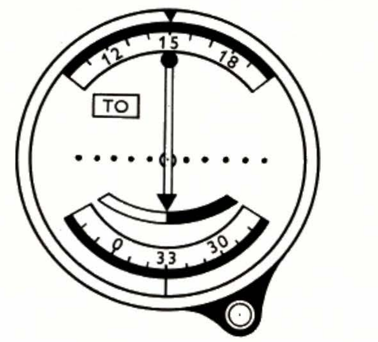


Fig. VI-19

La modulation de la fréquence porteuse est composée de deux signaux alternatifs de fréquence 30 hertz. L'un est émis suivant un mode de propagation circulaire et sert de référence de phase ; l'autre est émis sous forme d'un faisceau tournant à la vitesse de 30 tours par seconde. Le déphasage entre ces deux signaux a une valeur particulière qui est fonction de la position géographique (en coordonnées polaires) du récepteur par rapport à l'émetteur. Par définition, la valeur de déphasage zéro est attribuée aux positions situées sur l'axe de référence dirigé depuis l'émetteur vers le pôle Nord magnétique.

L'indicateur de V.O.R. est un phasemètre qui comporte une couronne, graduée en degrés, généralement actionnée par l'intermédiaire d'un bouton de commande manœuvré par le pilote jusqu'à ce que l'aiguille d'un galvanomètre de contrôle indique zéro. Lorsque le zéro est obtenu, la valeur angulaire lue sur la couronne graduée indique la valeur angulaire de la route magnétique à suivre pour rejoindre la station émettrice, mais avec une incertitude de 180°. Pour lever l'indétermination, un index complète l'installation. Cet index, qui apparaît dans une petite fenêtre située sur le cadran de l'indicateur, est en position « *TO* » (vers) lorsque l'angle mesuré indique la route à suivre pour rejoindre la station. Il est en position « *FROM* » (depuis) lorsque l'angle mesuré indique la route suivie depuis la station.

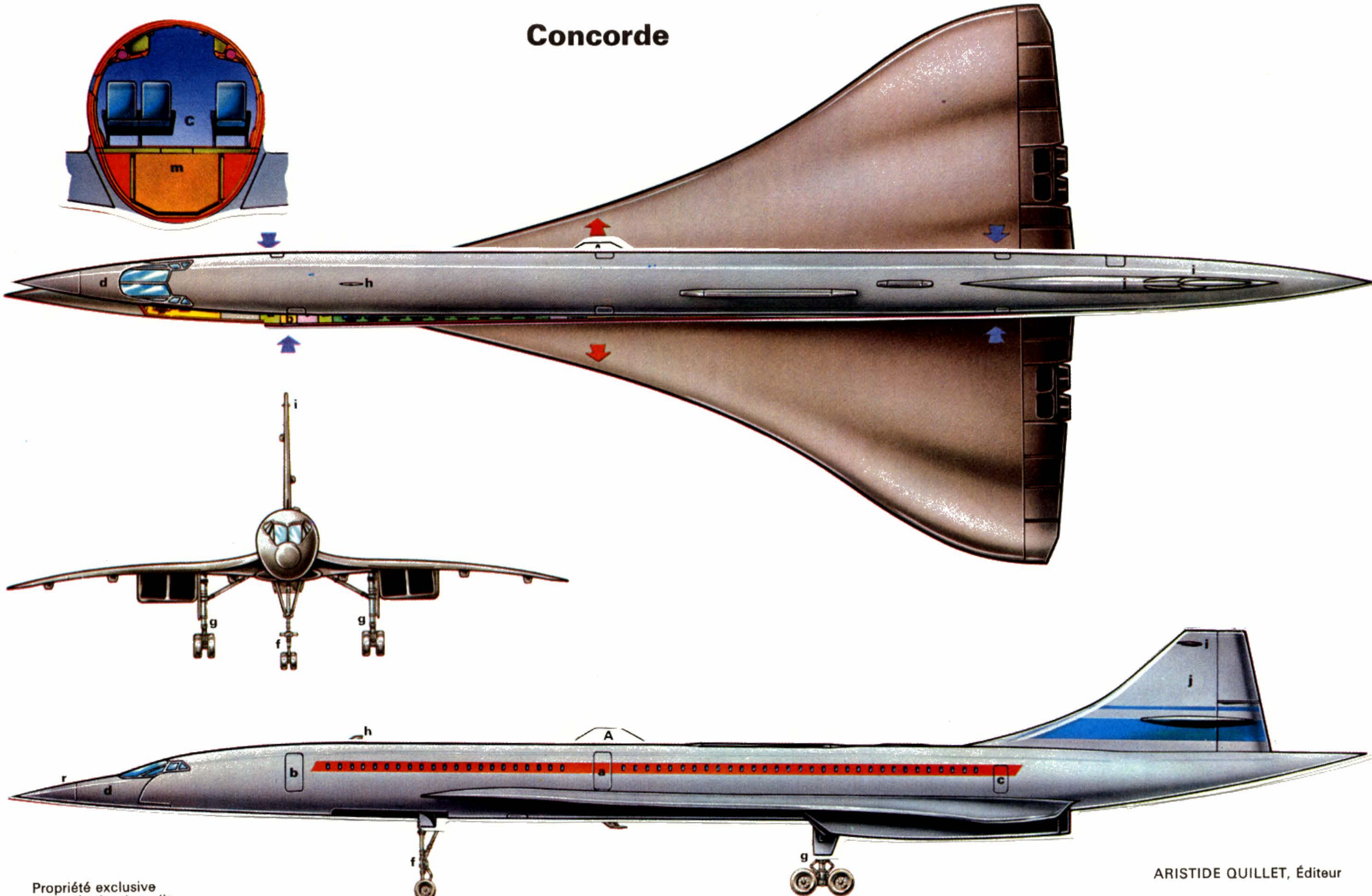
Lorsque l'aéronef passe à la verticale de la station et que la couronne graduée est maintenue en position fixe, l'index de lever de doute bascule assez brusquement de la position « *TO* » à la position « *FROM* », ce qui donne un excellent repère de navigation. Cet index possède une troisième position « *OFF* » (arrêt) qui indique, soit que l'ensemble V.O.R. n'est pas sous tension, soit que le niveau des signaux est inférieur aux limites normales et que les informations données par l'indicateur sont erronées.

Pour une valeur choisie de la route à suivre, le pilote affiche l'angle correspondant sur la couronne graduée. Si l'aéronef n'est pas situé sur cette route ou sur la route inverse, l'aiguille du galvanomètre est écartée du zéro. Pour rejoindre la route, le pilote doit corriger la direction suivie par l'aéronef dans le sens qui lui est indiqué par l'aiguille. Cela est vrai aussi bien pour la position « *TO* » que pour la position « *FROM* » de l'index de lever de doute. Des exemples sont donnés par la figure VI-20. Notons que l'indication ne

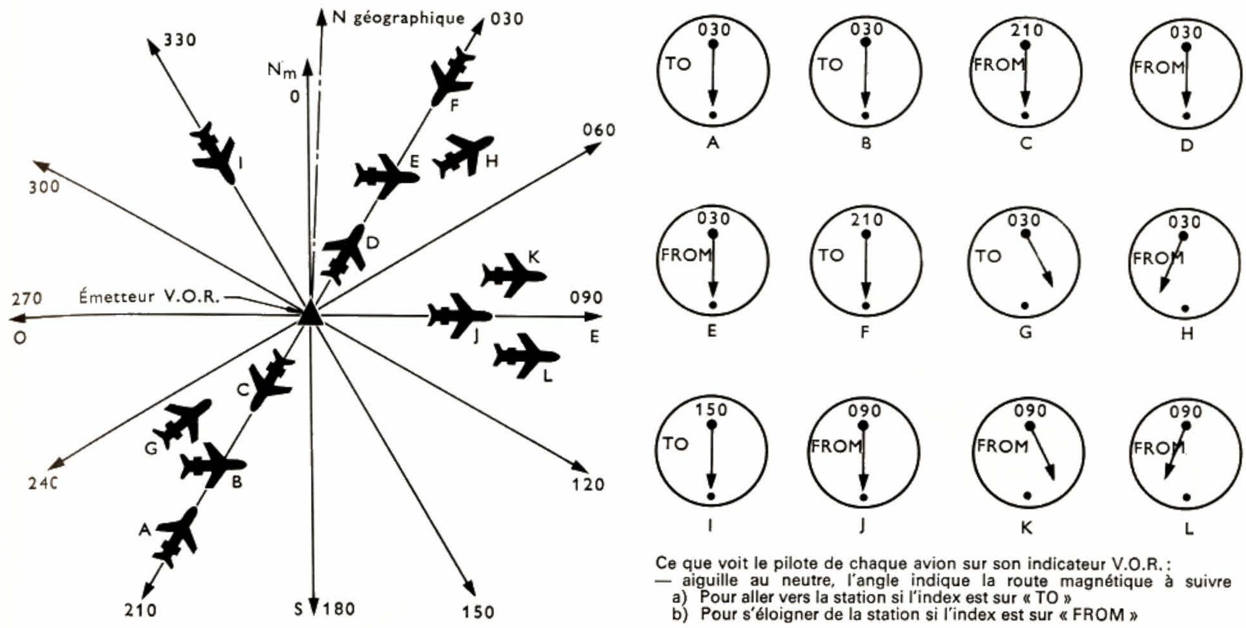
Concorde
avion supersonique de ligne

A. Aménagement mixte
   1. Première classe : 27 sièges
   2. Classe économique : 72 sièges
B. Aménagement de la classe économique
C. Section aménagement de la première classe
D. Section aménagement de la classe économique
a. Porte de secours
b. Porte d'accès avant
c. Porte d'accès arrière
d. Pointe avant
e. Poste d'équipage
f. Train d'atterrissage avant
g. Train d'atterrissage principal
h. Antenne V.H.F.
i. Antenne V.O.R.
j. Dérive
k. Porte d'accès au compartiment à bagages arrière
l. Compartiment à bagages arrière
m. Soute à bagages placée sous le plancher
n. Compartiment des équipements
o. Réservoirs de fuel
p. Logement du train avant
q. Logement du train principal
r. Radar météorologique
s. Compartiment électronique
t. Toilettes
u. Office
v. Vestiaire

Concorde



ARISTIDE QUILLET, Éditeur



Ce que voit le pilote de chaque avion sur son indicateur V.O.R. :
— aiguille au neutre, l'angle indique la route magnétique à suivre
a) Pour aller vers la station si l'index est sur « TO »
b) Pour s'éloigner de la station si l'index est sur « FROM »

Fig. VI-20 — Exemples d'utilisation d'un indicateur V.O.R.

dépend pas de l'orientation de l'avion, mais seulement de sa position géographique par rapport à l'émetteur.

La déviation totale de l'aiguille correspond à un écart d'environ 10 degrés entre la route affichée sur la couronne graduée et la route suivie par l'aéronef.

L'indicateur de V.O.R. comporte généralement une couronne graduée de 0 à 360°, un bouton de commande de la couronne, un index de lever de doute et un galvanomètre superposé au cadran (V. fig. VI-19). Un poste récepteur associé comporte un sélecteur de fréquences et une commande de niveau sonore. De plus les émetteurs transmettent un signal sonore en code Morse; il est audible dans les installations d'écoute de bord, ce qui permet leur identification indépendamment de la fréquence d'émission qui les caractérise.

La portée des émetteurs est liée aux lois de propagation des ondes de très hautes fréquences et, pratiquement, c'est la portée des signaux optiques. À la surface du globe cela correspond à une portée de 70 km environ, à une altitude de 300 mètres. Cette portée est voisine de 200 km à une altitude de 3 000 mètres. Les obstacles naturels (relief en particulier) perturbent les transmissions de ces signaux.

La précision sur l'indication de la route magnétique est proche de 2 degrés.

De nombreuses procédures permettent aux pilotes de connaître la position de leur avion. L'utilisation de deux récepteurs V.O.R. appelés par exemple R_1 et R_2, réglés respectivement sur des stations émettrices E_1 et E_2 permet de situer rapidement et simplement l'aéronef qui est alors placé au point d'intersection des routes indiquées par chacun des instruments R_1 et R_2 (fig. VI-21). Lorsque le pilote ne dispose que d'un seul récepteur il effectue deux mesures successivement sur chacune des deux fréquences E_1 et E_2.

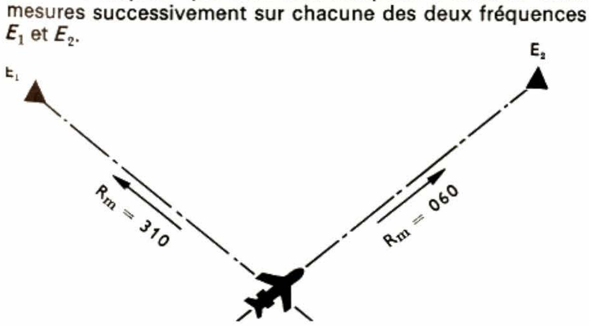


Fig. VI-21 — Position définie par l'intersection des deux pentes indiquées par les instruments récepteurs V.O.R. R1 et R2 de l'avion

10.2. Indicateur de radio-compas (fig. VI-22). — L'ensemble radio-compas est constitué par les éléments de base suivants :

— Un récepteur fonctionnant dans la gamme des fréquences moyennes de 100 à 1 750 kilohertz.

— Un cadre de réception orientable situé à l'extérieur de l'avion et entraîné par un moteur d'asservissement. Le moteur reçoit ses informations depuis le récepteur et oriente le cadre dans la direction de l'émetteur en fonction de l'amplitude des signaux reçus. Un dispositif de détection transmet la position du cadre à un indicateur.

— Un indicateur qui donne la position du cadre par rapport à l'axe longitudinal de l'aéronef à partir des informations fournies par le transmetteur de position du cadre. Comme pour le V.O.R., les stations émettrices sont généralement placées sur le trajet emprunté par les voies aériennes. Certains émetteurs de radiodiffusion de l'O.R.T.F., situés dans les « grandes ondes » comme, par exemple, l'émetteur d'Allouis (France Inter), peuvent être reçus par les récepteurs de radio-compas.

En vol, le récepteur est réglé sur la fréquence correspondant à la station. Le cadre s'oriente vers celle-ci, en faisant indirectement tourner la couronne de l'indicateur; elle est graduée en degrés (V. fig. VI-22). L'angle ainsi représenté, ou angle de « gisement », correspond à l'angle que font l'axe longitudinal de l'avion et la direction de la station.

En un point géographiquement défini où se trouve l'aéronef, l'angle mesuré varie en fonction de l'orientation de l'avion, ce qui n'était pas le cas lors de l'utilisation du V.O.R.

Si le pilote désire connaître la direction de la route magnétique à suivre pour aller vers la station émettrice,

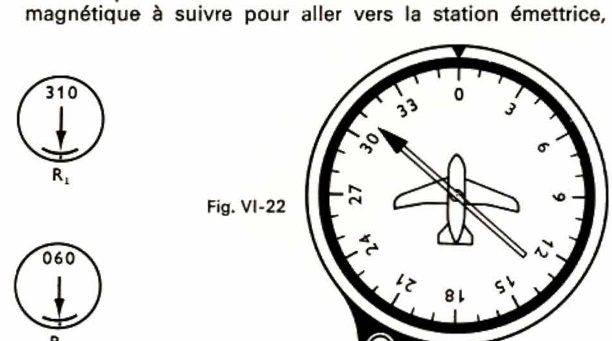
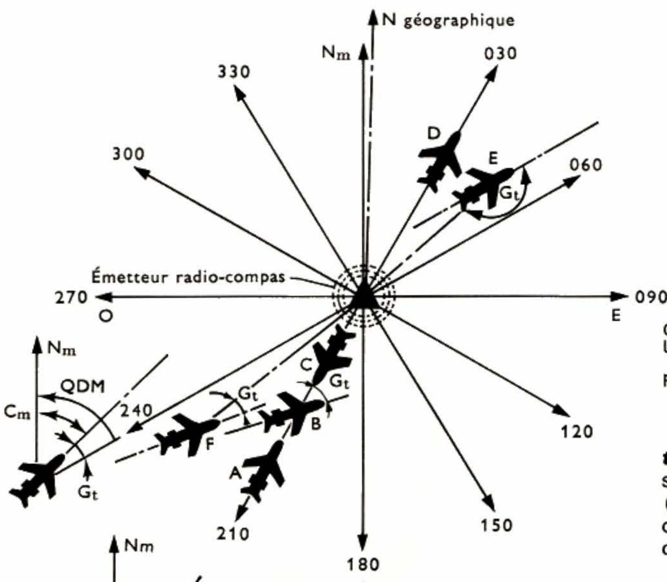
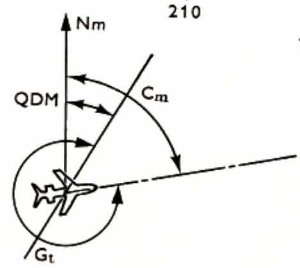


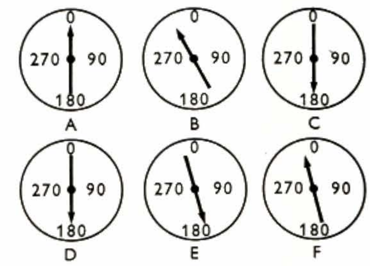
Fig. VI-22

Indicateur de radio-compas (*Jaeger*)





Route magnétique vers la station QDM.
QDM = cap magnétique C_m + gisement G_t



Ce que voit le pilote de chaque avion sur son indicateur de radio-compas. L'angle lu est G_t. Si $G_t = 0$, l'axe de l'avion est dirigé vers la station

Fig. VI-23 — Exemples d'utilisation d'un indicateur de radio-compas

direction appelée « relèvement magnétique » (R_m), il doit tenir compte de la valeur du gisement G_t indiqué par le radio-compas et de la valeur du cap magnétique C_m qui est l'angle fait par l'axe de l'aéronef par rapport à la direction du Nord magnétique.

L'opération suivante est alors à effectuer :

$$R_m = G_t + C_m$$

La figure VI-23 montre graphiquement ce calcul qui est facilité en pratique par la disposition des éléments constitutifs de l'indicateur de radio-compas.

Le radio-compas est un instrument de mesure dont les qualités sont liées à celles de la propagation des ondes moyennes. La portée, qui est fonction de la puissance de l'émetteur, est couramment de plusieurs centaines de kilomètres, même à basse altitude, ce qui est plus élevé que la portée d'un V.O.R. dans les mêmes conditions. Les perturbations atmosphériques diminuent notablement la qualité des informations reçues, en particulier à proximité des orages. La précision sur l'indication du gisement est généralement voisine de 5 à 10 degrés.

Les procédures d'utilisation sont sensiblement les mêmes que celles qui concernent le V.O.R. mais le mode d'interprétation est différent par suite de l'influence de l'orientation de l'avion sur la mesure du relèvement magnétique par rapport à l'émetteur.

10.3. Indicateur I.L.S. *(Instrument Landing System).* — L'I.L.S. de bord est un dispositif d'aide à l'atterrissage sur les pistes équipées des émetteurs correspondants (fig. VI-24). Deux récepteurs de bord reçoivent des signaux d'un couple d'émetteurs dont les caractéristiques sont telles que les faisceaux émis se coupent suivant un axe situé

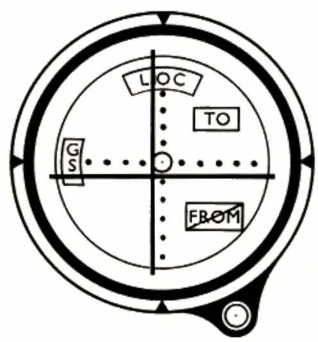


Fig. VI-24

Indicateur I.L.S.

dans le prolongement de la piste. Cet axe constitue l'axe de descente imposé pour l'atterrissage. La pente de descente est généralement de 2,5 degrés (fig. VI-25).

L'indicateur I.L.S. reçoit ses signaux des deux récepteurs de bord et donne au pilote la position relative de l'avion par rapport à deux plans orthogonaux dont l'intersection forme l'axe de descente. Chacun des plans est figuré par une aiguille. L'intersection des aiguilles représente la position de l'axe de descente par rapport à l'avion figuré par un repère rond fixe situé au centre du cadran.

Les deux récepteurs peuvent fonctionner indépendamment. L'ensemble émetteur-récepteur qui permet le contrôle en direction vers le prolongement de l'axe de la piste, s'appelle le « localizer ». L'ensemble émetteur-récepteur qui permet le contrôle en descente, s'appelle le *glide path* (fig. VI-26).

La station sol « localizer » est située à l'extrémité de la piste d'atterrissage et permet, si nécessaire, le guidage même après l'atterrissage. La fréquence d'émission est située dans la bande de 108,1 à 111,9 mégahertz dans une portion de la bande affectée au V.O.R. La portée est voisine de 20 km et le faisceau fait un angle proche de ± 10 degrés autour de l'axe central.

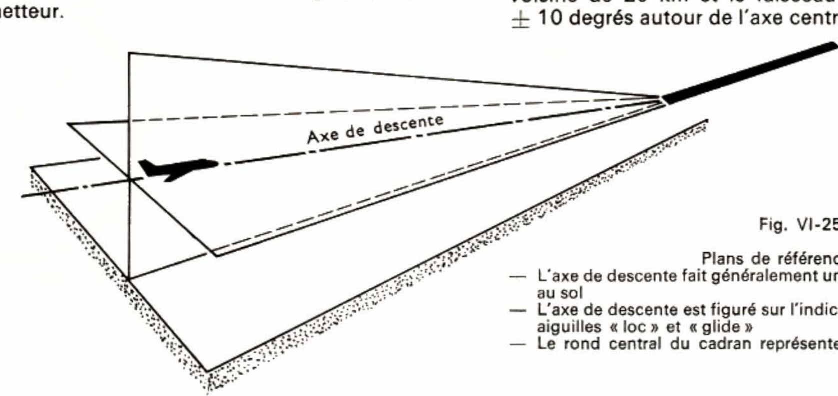


Fig. VI-25

Plans de référence I.L.S.
— L'axe de descente fait généralement un angle de 2,5 degrés par rapport au sol
— L'axe de descente est figuré sur l'indicateur par l'intersection des deux aiguilles « loc » et « glide »
— Le rond central du cadran représente la position relative de l'avion

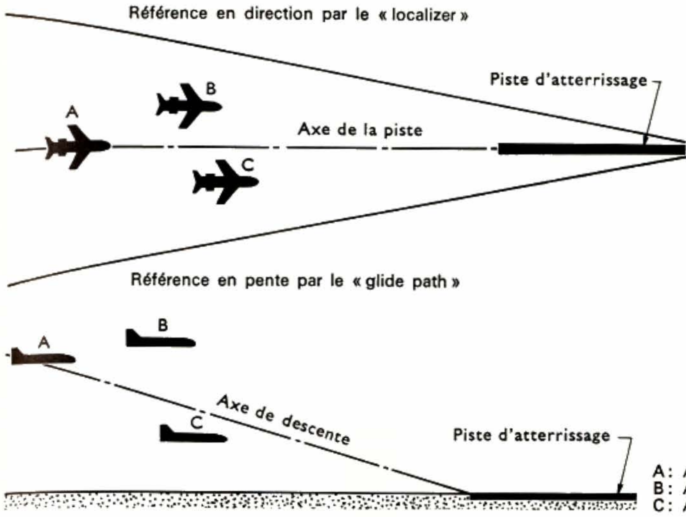
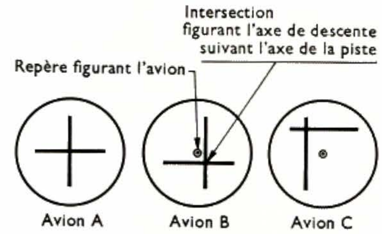


Fig. VI-26

Exemples d'utilisation d'un indicateur I.L.S.



A : Avion bien en hauteur et dans l'axe de la piste
B : Avion trop haut et à gauche
C : Avion trop bas et à droite

Le signal est modulé par deux signaux différents émis par un ensemble d'antennes dont les caractéristiques particulières permettent de différencier les deux côtés situés de part et d'autre d'un plan vertical qui contient l'axe de la piste. Un avion situé dans ce plan reçoit simultanément un signal modulé à 90 Hz et un signal modulé à 150 Hz. Ces deux signaux ont la même amplitude. Leur différence est nulle et aucun courant ne traverse le galvanomètre qui porte l'aiguille verticale : celle-ci se place au centre de l'indicateur, face au repère avion (avion A, fig. VI-26).

Un avion situé à gauche de l'axe (avion B, fig. VI-26) recevrait un signal modulé à 90 Hz d'amplitude supérieure à celle du signal modulé à 150 Hz. Un courant est reçu par l'indicateur dans un sens tel que l'aiguille verticale se déplace vers la droite montrant ainsi que l'axe de la piste est situé à la droite de l'avion. On déduit de même les éléments concernant l'avion C situé à droite de l'axe.

La station sol « glide path » est située au bord et à environ 250 m après l'entrée de la piste d'atterrissage. La fréquence d'émission est située dans la bande de 328,6 à 335,4 mégahertz. La portée de l'émetteur est souvent légèrement inférieure à celle de l'émetteur « localizer » et le faisceau fait un angle voisin de $\pm$ 8 degrés autour de l'axe de descente.

Le principe de fonctionnement est similaire à celui du « localizer » mais les antennes permettent la séparation en deux zones dans le sens vertical, par rapport à un plan horizontal qui contient l'axe descente. La zone située au-dessus du plan correspond à une réception modulée par un signal de fréquence égale à 90 hertz (avion B, fig. VI-26). La zone située au-dessous correspond à une réception modulée par un signal à 150 hertz (avion C, fig. VI-26).

Un signal d'identification en code morse, modulé à 1 020 hertz, est émis à intervalles réguliers par la station « localizer ». Il est reçu dans l'installation téléphonique de bord.

Lorsque le pilote affiche la fréquence correspondant à la station « localizer » désirée, le récepteur « glide path » est automatiquement accordé sur la fréquence de l'émetteur correspondant, les couples de fréquences étant imposés par un règlement international.

Les stations « localizer » peuvent être reçues par les récepteurs V.O.R. et, dans ce cas, l'aiguille de l'indicateur V.O.R. indique la direction à prendre pour rejoindre le faisceau correspondant à l'axe de la piste.

En complément, des balises situées au sol, dans l'axe de la piste, émettent chacune, selon un faisceau vertical très étroit, un signal de fréquence 75 mégahertz. Ce signal est reçu à bord par un récepteur spécial appelé « marker » qui, au passage à la verticale, provoque l'allumage d'un voyant d'identification dans le poste de pilotage et l'émission d'un son dans l'installation téléphonique de bord. Deux ou trois balises identifiées par un son et un voyant particuliers sont placées le long du parcours final à des distances bien définies et permettent au pilote de se situer très exactement en position, notamment de nuit ou par très mauvais temps.

Les installations au sol sont classées par catégories suivant leurs caractéristiques et en particulier leur précision.

Les aéronefs équipés d'ensembles récepteurs I.L.S. réglementaires sont autorisés à atterrir lorsque les conditions météorologiques sont au minimum :

a) Pour la catégorie la moins précise :

— 200 pieds (soit environ 60 m de hauteur) pour la base des nuages ;

— 800 mètres de visibilité dans l'axe de la piste.

b) Pour la catégorie la plus précise :

— Pas de limitation technique, la visibilité pouvant être nulle. Les avions ne transportant pas de passagers (avions postaux, fret...) sont autorisés à atterrir en toutes conditions.

Par sécurité, les avions commerciaux transportant des passagers sont limités par les règlements au-dessous des valeurs minimales de 100 pieds (30 m) pour la base des nuages et 400 mètres de visibilité. Progressivement, les avions sont autorisés à atterrir par visibilité nulle lorsque leur installation de bord comporte un système d'atterrissage automatique qui permet l'atterrissage sans intervention du pilote à partir des signaux I.L.S.

Remarques : Les instruments de bord décrits ci-dessus sont les instruments classiques que l'on rencontre comme équipements principaux dans les postes d'équipage des aéronefs de tourisme, commerciaux ou militaires. Cependant, suivant les types d'aéronefs, de nombreux autres instruments principaux ou de servitude sont nécessaires. Les principes de base restent presque toujours les mêmes : contrôler des positions d'organes, des pressions, des températures, des vitesses de rotation, etc.

La chaîne de mesure comporte généralement un *détecteur* situé près du point de mesure et un *transmetteur* reliant le détecteur à un *indicateur* situé dans le poste d'équipage. Les signaux électriques sont, de plus, adressés à des systèmes de *contrôle automatique*. Souvent les signaux issus des transmetteurs sont transformés et mélangés à d'autres, de manière telle qu'une synthèse soit faite et que le signal adressé à l'indicateur soit simple et immédiat à exploiter.

Les indicateurs se présentent alors sous des formes diverses, accompagnés de « boîtes noires » (ensemble de l'équipement nécessaire au fonctionnement) ou à électronique incorporée ; ce sont fréquemment des calculateurs compliqués qui simplifient la tâche de l'équipage.

Lorsque les mécanismes à entraîner sont complexes et lourds, pour certaines figurations, il devient nécessaire d'employer un asservissement motorisé contrôlé par un ensemble électronique. Ces dispositifs permettent la réalisation d'indicateurs de très hautes performances dont la fiabilité est néanmoins très bonne, malgré leur complexité, par suite de l'emploi de circuits intégrés électroniques.

11. AMÉNAGEMENT DES AVIONS CIVILS

On ne traitera que l'aménagement des avions de ligne, celui des avions d'affaire et d'aviation générale étant sensiblement le même, mais généralement plus simple.

11.1. Dispositions générales. — La partie avant des fuselages des avions civils est occupée par le poste de pilotage, qui précède la cabine des passagers ; celle-ci est complétée par des vestibules situés face aux portes d'entrée, par des cuisines-garde-manger, des vestiaires et des toilettes (fig. VI-27 et VI-28).

11.2. Le poste de pilotage. — Il est aménagé pour le chef-pilote et le copilote, assis à l'avant, respectivement à gauche et à droite, devant la planche de bord qui comprend les divers instruments indicateurs et de contrôle, et de part et d'autre d'un pupitre central comportant toutes les manettes et interrupteurs nécessaires à la commande des moteurs et à la manœuvre des divers autres mécanismes de l'avion (fig. VI-29). Leurs sièges peuvent se déplacer sur des rails, d'avant en arrière, pour faciliter l'accès aux postes de travail et pour pouvoir régler les distances des sièges aux pédales de la commande de direction.

Les avions les plus importants ont souvent un équipage de quatre membres, à savoir, outre les pilotes, un mécanicien-ingénieur et un radio-navigateur, assis devant des planches de bord latérales.

Le poste est vitré par un pare-brise à glaces multiples, dont l'une, à la gauche du chef-pilote, est ouvrante.

11.3. La cabine des passagers. — Les sièges des passagers sont soit monoplaces, principalement dans les avions d'affaires ou de tourisme, soit biplaces (fig. VI-30), soit encore triplaces (fig. VI-31) comme dans certains avions de ligne. Le plus souvent, ils sont pourvus de dossiers

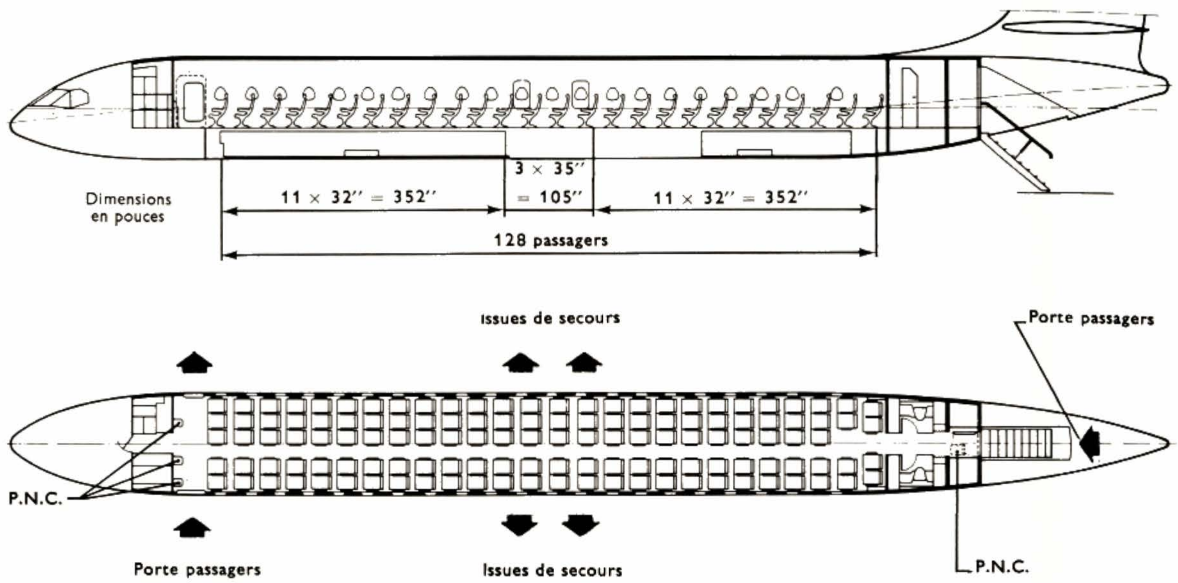


Fig. VI-27 — Aménagement de Caravelle 12 en classe touriste (*Aérospatiale*)

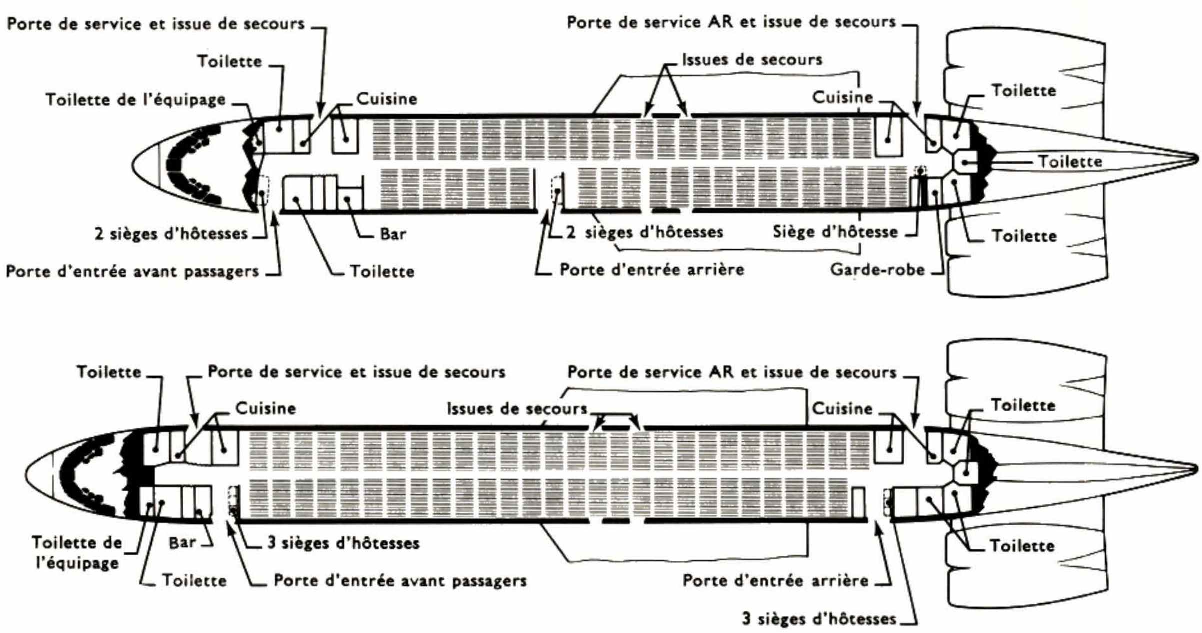


Fig. VI-28 — Aménagement des Vickers V.C. 10 et super V.C. 10 en classe passagers (*Vickers*)



Fig. VI-29

Poste de pilotage du Vickers VC 10 (*Vickers-Armstrongs Aircraft Ltd*)



Fig. VI-30

Siège biplace à dossier basculant (*S.I.P.A.*)



Fig. VI-31

Siège triplace (*S.I.P.A.*)



Fig. VI-32 — Intérieur de la cabine des passagers à bord de l'Airbus (*Aérospatiale*)

inclinables à deux positions, l'une sensiblement verticale, l'autre penchée vers l'arrière, pour rendre un long voyage plus confortable.

Le dossier, en position inclinée vers l'arrière, rétrécit l'espace compris entre deux rangées consécutives de fauteuils, et rend ainsi plus difficile l'accès aux sièges éloignés des couloirs. Pour remédier à cet inconvénient, la société S.I.P.A. (France) construit des sièges « Espace », montés sur un grand nombre de Caravelle, conçus de façon telle que lorsque l'on incline le dossier, le bord supérieur glisse à la verticale (V. fig. VI-31) en même temps que le bord inférieur avance et entraîne le fond du siège vers l'avant. Dans cette position, le passager glisse ses jambes sous le fauteuil qui se trouve devant lui. Chaque siège est pourvu d'accoudoirs de chaque côté ainsi qu'entre les sièges multiples. Ils portent à leurs extrémités des cendriers et les commandes du mécanisme d'orientation des dossiers. Les sièges sont équipés, au dos, de tablettes rabattables, visibles sur la figure VI-31, et utilisées, en particulier pour poser les plateaux-repas.

Chaque ensemble de fauteuils possède deux ou quatre pieds terminés par des ferrures qui s'engagent dans deux rails fixés au plancher de la cabine. Ces rails sont munis d'encoches semi-circulaires qui permettent une solide fixation des sièges. Le pas de ces encoches est standardisé à un pouce (25,4 mm), ce qui permet de modifier le « pas » entre les rangées consécutives de fauteuils, mais seulement pour des écarts multiples du pouce.

Le pas le plus couramment utilisé est de 32 pouces (820 mm) dans le version touriste. On l'augmente jusqu'à 34 pouces (870 mm) pour les fauteuils de la première classe, et on le réduit, parfois, jusqu'à 31 pouces (790 mm) pour la version économique.

Chaque siège est équipé, également, d'une ceinture ventrale de sécurité, constituée de deux éléments et d'une boucle centrale à ouverture instantanée, dont l'utilisation est obligatoire lors du décollage et de l'atterrissage de l'avion. La figure VI-32 montre, à titre d'exemple, l'intérieur d'une cabine installée en version « haute densité » avec trois banquettes triplaces par rangée, soit avec neuf fauteuils de front, desservis par deux couloirs de circulation.

Au-dessus des sièges, tout au long des parois, sont installés des porte-bagages, pour les petits bagages à main. Sur les appareils anciens, ces porte-bagages n'étaient pas clos (ils étaient semblables à ceux des wagons de chemin de fer) et lors de vols par mauvais temps, il arrivait que ces petits bagages, cependant parfois assez lourds, tombent sur la tête de passagers. Pour éviter cela, sur les nouveaux avions, ces porte-bagages sont munis de portes, avec fermetures, qui s'ouvrent, soit en pivotant vers le haut (fig. VI-33), soit en glissant, le long des rails, à l'intérieur du compartiment bagages. Parfois, des coffres pour ces bagages sont aménagés au centre de la cabine, entre les fauteuils de la rangée du milieu (V. en bas et à droite de la figure VI-33). Les parois inférieures des porte-bagages sont souvent utilisées pour supporter différents aménagements supplémentaires, au-dessus de chacune des rangées de fauteuils, notamment : une lampe « liseuse » individuelle, un orifice orientable d'un jet d'air frais réglable en débit, dérivé du circuit de conditionnement (un pour chaque passager), ainsi qu'un bouton d'appel de l'hôtesse. Toute cette installation doit être placée assez bas pour pouvoir être manœuvrée par le passager assis, sans cependant le gêner lorsque ce même passager se lève ; ce sont là des conditions difficiles à concilier.

Les hublots qui étaient assez grands lorsque les avions volaient à altitude relativement faible sont maintenant nettement plus petits (300 × 450 mm environ). Cet inconvénient n'est pas très important car à partir d'altitudes de 8 000 à 10 000 m (altitude de croisière des avions de ligne actuels) la visibilité n'est plus très spectaculaire. Par ailleurs, ces faibles dimensions de hublots facilitent la construction du fuselage ; chaque hublot est compris entre deux cadres successifs, ce qui correspond, en moyenne, à deux hublots par rangée de passagers.

Dans le même ordre d'idées, la cabine de l'avion supersonique Concorde est éclairée par des hublots minuscules (110 × 160 mm environ), les vols de croisière étant prévus à des altitudes comprises entre 18 000 et 20 000 mètres.



Fig. VI-33 — Installation des porte-bagages dans le Lockheed « Tristar » (*Lockheed-California C°*)

Ces hublots sont garnis de rideaux, souvent en matière plastique opaque repliés dans l'épaisseur de l'habillage au-dessus de la fenêtre ; pour les sortir on les tire vers le bas. Les hublots, étant constitués par une double vitre, celle de l'intérieur est, parfois, dotée d'un système à polarisation de la lumière ; un bouton tournant permet d'orienter cette vitre et d'obtenir une teinte bleuâtre, protégeant le passager contre les rayons du soleil, trop gênants.

L'éclairage électrique général de la cabine, faible pendant le jour, fort le soir, et de nouveau très réduit pour la nuit, est réalisé, soit par des rampes lumineuses dépolies, placées au plafond (comme dans le Caravelle) soit, pour les avions plus récents, par une lumière indirecte, les sources étant masquées par des bandes opaques, faisant partie des porte-bagages ou du plafond de la cabine.

Les sièges des hôtesses et des stewards sont en général conçus sous forme de strapontins repliables contre la paroi, avec un dossier fixe.

Des panneaux lumineux placés sur les cloisons, face aux passagers et commandés par l'hôtesse principale indiquent les ordres de boucler les ceintures durant le décollage, avant l'atterrissage, ou encore par mauvais temps, ordres répétés par haut-parleurs.

Dans certains avions existent des vestiaires avec porte-manteaux, refermés par des rideaux.

Dans le cas d'un aménagement mixte, première classe et classe touriste, la première classe se trouve, en général, dans la partie avant de la cabine. Elle est desservie par des portes spécialement réservées. Les sièges sont plus larges, ce qui réduit le nombre de fauteuils de front.

Les long-courriers de la compagnie TWA sont dotés de fauteuils triplaces, le dossier du siège central étant rabattable vers l'avant ; dans le cas où tous les fauteuils ne seraient pas occupés, le dos de ce dossier, une fois rabattu, peut servir de table pour les passagers occupant les deux places restantes.

On trouve dans les long-courriers des bar-buvettes, et même des salons de repos luxueusement aménagés. Par exemple dans le Boeing 747, un salon de repos se trouve au-dessus de la cabine ; il est accessible par un escalier en colimaçon.

Des compartiments WC-toilettes sont installés, de préférence à l'arrière de la cabine des passagers (V. fig. VI-28).



Fig. VI-34 — Cuisine à bord du Lockheed « Tristar » (*Lockheed-California C°*)

Dans les appareils à grande capacité de transport de passagers, on les trouve divisés en deux groupes, l'un derrière, et l'autre devant cette cabine (V. fig. VI-28). Il faut compter, en moyenne un compartiment-toilettes par 40 passagers. Chaque toilette comporte un siège WC avec une chasse d'eau et un fond basculant à l'aide d'une pédale. Les matières accumulées dans un bac sont vidangées à chaque escale, à travers un couvercle à fermeture étanche, situé sous le fuselage (un réservoir-remorque est spécialement conçu à cet effet). En outre les toilettes sont dotées d'un lavabo, encastré dans un meuble, ainsi que d'un ou plusieurs miroirs; l'ensemble est souvent aménagé luxueusement.

À bord des avions court-courriers, qui volent à l'heure du repas, et sur tous les avions moyen et long-courriers, on sert le déjeuner ou le dîner.

Dans la plupart des cas, ces repas sont servis froids; ils sont préparés à l'avance sur des plateaux et stockés avant le départ de l'avion dans un meuble « garde-manger ». On emporte également des boissons fraîches et chaudes dans des récipients « thermos ». Le service, assuré par les hôtesses, se fait à l'aide d'un chariot, manœuvré le long des couloirs, entre les fauteuils.

Dans l'avion Lockheed « Tristar » de la Eastern Airlines une cuisine est installée à l'étage des soutes, sous le plancher de la cabine (fig. VI-34). La cuisine est équipée d'un four à infrarouges, pour réchauffer les plats. Deux ascenseurs (V. fig. VI-34) permettent de remonter les hôtesses au niveau de la cabine des passagers, avec leurs chariots garnis des plateaux.

11.4. Les soutes à bagages. — Elles sont placées sous le plancher de la cabine devant et derrière l'aile et derrière le compartiment abritant le train; elles sont desservies par des portes, à fermeture étanche, qui s'ouvrent, en pivotant, vers le haut (fig. VI-35). La mise en place de bagages, pièce par pièce, demandant beaucoup de temps, on remplace ce procédé par un système plus rapide, en utilisant des conteneurs, chargés au préalable dans l'aréogare. Ils sont acheminés vers l'avion par des voitures spéciales dotées d'un système de hissage. On introduit les conteneurs dans la soute en les glissant sur des rouleaux faisant partie du plancher de ce compartiment.

11.5. Le conditionnement d'air des parties habitables de l'avion. — Les avions de transport de passagers volent actuellement à des altitudes comprises entre 8 000 et 10 000 m, où les températures se maintiennent entre — 40 °C et — 55 °C et où la pression atmosphérique varie entre 0,35 fois et 0,25 fois la pression au sol.

Le conditionnement a pour but de maintenir dans l'intérieur de la cabine une température presque constante d'environ 22 à 25 °C et une pression correspondante à une altitude voisine de 2 500 m, facilement supportable par les passagers. De plus, avant le départ il faut assurer au sol un préchauffage de la cabine par temps froid et la refroidir par temps très chaud.

Il faut, en premier lieu, protéger cette cabine contre un échange trop rapide de chaleur à travers sa paroi. Dans ce but, on recouvre la structure interne de la coque, entre chaque couple, d'une couche épaisse, de 3 à 5 cm, d'un matériau isolant, en général, en plastique expansé.

En même temps, on obtient ainsi une insonorisation, protégeant les passagers du bruit des moteurs. Un habillage en tissu plastique coloré est ensuite posé sur une couche de molleton (en coton) par-desus l'ensemble de la structure, couples compris. Il est fixé au moyen de bandes adhérentes « multi-attaches » (comme, par exemple, les bandes « Velcro »). Le plancher est revêtu d'un tapis posé sur une thibaude épaisse.

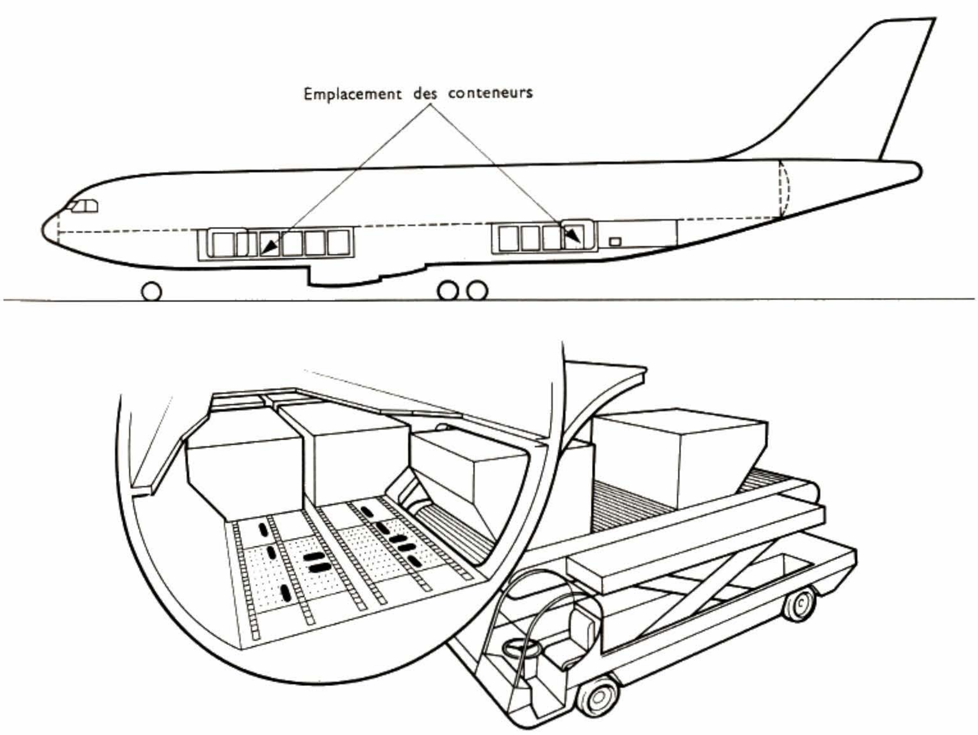


Fig. VI-35

Le chargement des conteneurs dans les soutes de l'Airbus A 300 B à l'aide d'un chariot élévateur (*Airbus Industrie*)

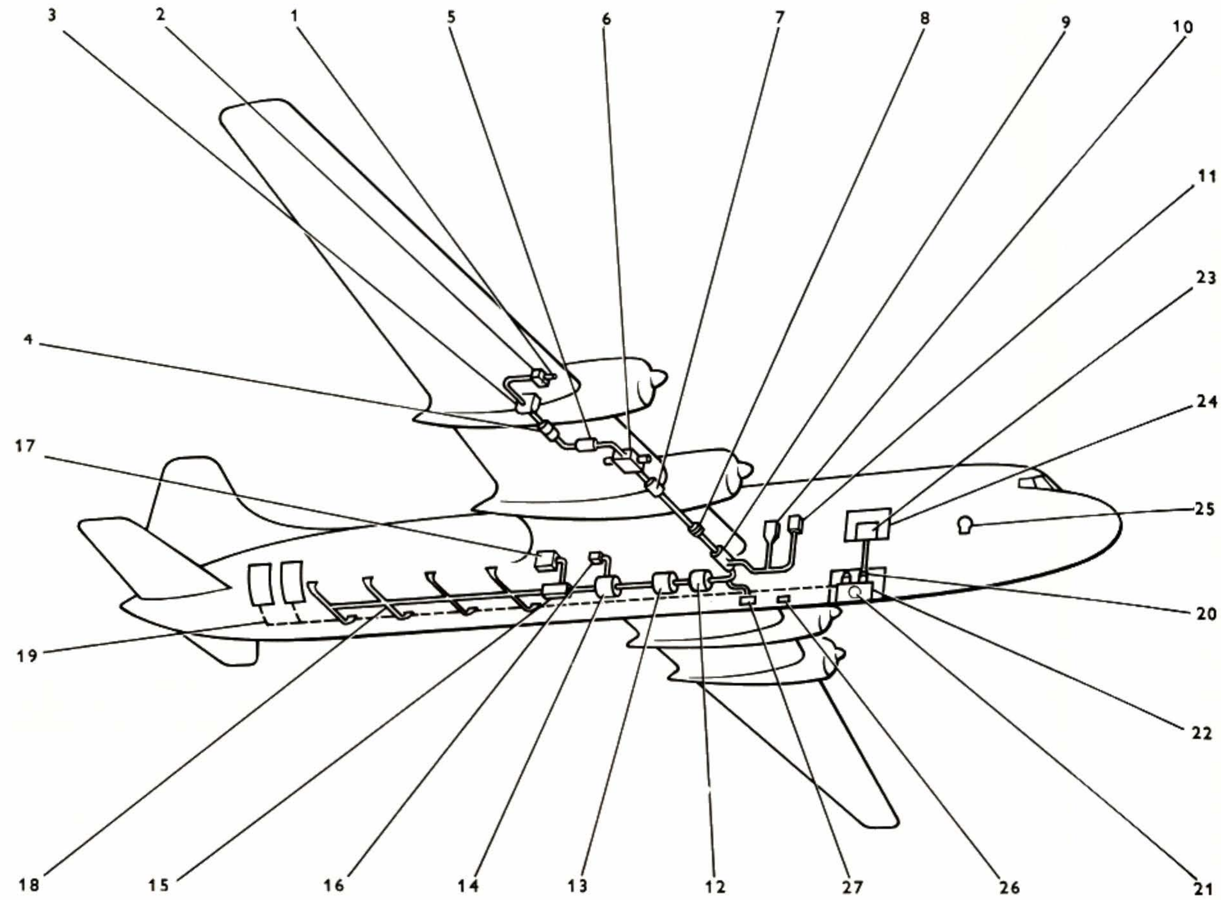


Fig. VI-36 — Schéma d'un système de condition d'air d'un avion civil (*Normalair Ltd*)

Le chauffage et la pressurisation sont réalisés par l'envoi d'air chaud comprimé à l'intérieur des parties habitables de l'avion. Cet air est pulsé par des compresseurs, entraînés par les moteurs de l'avion. Lors de la préparation de l'avion, avant le vol, les moteurs stoppés, on a recours à une source extérieure d'air chaud, ou froid, provenant d'une remorque motorisée, branchée sur les prises spéciales, extérieures à l'avion.

Pendant le vol, cet air doit être renouvelé régulièrement pour évacuer l'air vicié ; en fait, on insuffle dans la cabine une quantité d'air supérieure à celle qui serait strictement nécessaire, en évacuant le surplus dans l'atmosphère, à travers des soupapes tarées. D'ailleurs, cela compense en même temps un certain manque d'étanchéité de la coque (il est très difficile de la construire d'une façon rigoureusement étanche).

Par ailleurs, il est nécessaire de maintenir un certain degré « normal » d'humidité, surtout en haute altitude où l'air est plus sec qu'au sol. Pour cela, on injecte de l'eau pulvérisée dans le circuit de l'air comprimé.

La figure VI-36 donne, à titre d'exemple, le schéma d'un système de conditionnement. La prise d'air 1, protégée par un filtre 2, conduit l'air frais vers le compresseur 3, entraîné par le moteur. Cet air, réchauffé par la compression adiabatique, passe par un régulateur de débit 4, qui renvoie dans l'atmosphère l'excédent de l'air pulsé. Ensuite, l'air passe par un premier silencieux 5 vers un échangeur de chaleur 6 pour une première correction de la température. Après le deuxième silencieux 7, on trouve une valve de retenue (sens unique) 8 qui se referme automatiquement dans le cas d'une panne du compresseur et permet de conserver la pression dans la cabine. Un régulateur de débit 9, contrôlé par les instruments 10 et 11, a pour but de maintenir constante la masse d'air envoyée dans la cabine. Pour couvrir les pertes de charges dues au passage de l'air dans les tuyauteries, on utilise un autre ventilateur 12. L'air repasse encore par un réfrigérateur 13, un réchauffeur 14 et un humidificateur 15 (contrôlés et régulés automatiquement par les instruments 16 et 17) pour aborder la rampe de distribution 18. Cet air pénètre dans la cabine au ras du plancher par une série d'ouvertures à grilles, en chauffant ainsi, en premier lieu, le plancher de la cabine.

L'air vicié, repris par d'autres grilles, au même niveau 19, est conduit vers la soupape d'évacuation à l'air libre 20, contrôlée par le régulateur de pression automatique 21 ou manuel 22 (avec contrôles au poste de pilotage 23 et 24). Une soupape de sécurité et deux valves de réglage 25 de la variation de pression, lors de la descente de l'avion, complètent le système de conditionnement en vol. Les deux connexions extérieures 26 et 27 servent à l'alimentation du circuit au sol.

Pour des raisons d'économie, dans certains systèmes, on ajoute un réseau de « recyclage » d'une partie de l'air pulsé du circuit primaire.

Pour des raisons de sécurité, on installe un compresseur (3) avec son circuit de départ (4, 5, 6, 7 et 8) sur chacun des moteurs de l'avion.

12. AMÉNAGEMENT DES AVIONS MILITAIRES

12.1. Aménagement des avions monoplaces ou biplaces de combat. — Le pilote de ces appareils est protégé par un pare-brise fixe. Sa glace frontale *a* (fig. VI-37) est obligatoirement plane, car le viseur de tir se trouve juste derrière, et son rayon lumineux traverse cette glace.

Elle est, en général, exécutée en verre « feuilleté », composé de plusieurs couches de verre trempé, collées entre elles par une matière transparente plastique (exemple : les glaces « Triplex »).

Elle est, en outre, suffisamment épaisse (parfois jusqu'à 5 à 6 cm) pour pouvoir résister à une perforation par balles de faible calibre. On peut la dégivrer et la désembuer,

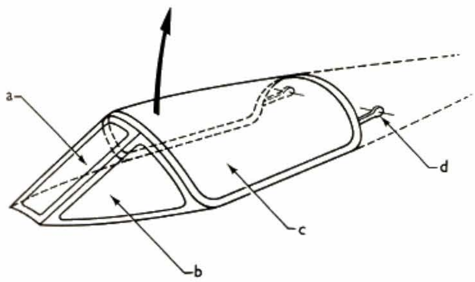


Fig. VI-37 — Pare-brise et verrière d'un intercepteur

soit par un jet d'air chaud, soit par un chauffage électrique, au moyen de grilles à fil très fin, ou de minuscules paillettes d'or, incorporées dans l'une des couches de matière plastique.

Les glaces latérales *b*, également en verre, mais moins épaisses, sont courbes à surfaces développables (tracées avec des génératrices rectilignes).

La verrière *c*, qui recouvre le pilote et son siège, est, d'une façon courante, exécutée en plexiglas moulé, courbe, avec une section transversale circulaire, indispensable pour résister sans déformation à la pressurisation du poste de pilotage. Cette verrière s'ouvre, pour donner l'accès au poste, en pivotant vers l'arrière autour des deux attaches *d*, dans la plupart des cas. Elle peut, en outre, être larguée en vol en cas de danger.

Si les deux postes d'un biplace sont placés en tandem, chaque poste possède sa verrière propre. Dans le cas, plus rare, de postes côte à côte (par exemple sur le General Dynamics F-III), les verrières sont articulées le long d'un bord, et s'ouvrent latéralement (pour le F-III, vers le haut et dans le plan de symétrie de l'avion).

Le pilote est assis sur un siège éjectable, doté d'un parachute.

à partir d'un avion immobile (éjection « zéro-zéro »).

Comme cette éjection peut avoir lieu en altitude, le pilote est muni d'un masque et d'une bouteille d'oxygène. De plus, ses pieds sont entravés par des sangles, qui ne gênent pas ses mouvements pendant le vol, mais resserrent les genoux au moment de l'éjection, afin que les jambes ne s'écartent pas dangereusement sous l'action de l'air, à grande vitesse.

Le pilote porte une combinaison spéciale, appelée « combinaison anti-G », munie de poches étanches (autour de ses jambes) qui se gonflent automatiquement quand l'avion effectue une manœuvre avec un facteur de charge élevé; elles exercent une pression sur la partie inférieure du corps, ce qui maintient le sang dans la partie supérieure et dans la tête. Cela retarde un éventuel malaise et des troubles visuels.

Le poste de pilotage est climatisé et pressurisé, soit par un prélèvement de l'air comprimé derrière le compresseur du réacteur, soit au moyen d'un groupe spécial analogue à celui utilisé pour le conditionnement d'air des avions civils. Un poste d'oxygène liquide de secours complète l'aménagement de base de ces avions.

12.2. Aménagement des avions de l'Aéronavale. — Ces avions, destinés à décoller et atterrir sur un porte-avion, comportent un équipement spécial pour le catapultage et pour l'appontage.

12.2.1. Le catapultage. — La catapulte des porte-avions modernes est installée, noyée dans le pont d'envol. Le crochet *a* (fig. VI-38) solidaire de la partie mobile de la catapulte *b*, se déplace le long d'une fente ménagée entre deux rails du pont. L'avion est muni de deux crochets *c*, assez ouverts, fixés sous le ventre, à l'avant du fuselage. Une élingue *d*, à deux branches en V, relie ces crochets à celui de la catapulte. Une ferrure *e*, fixée sous l'arrière du

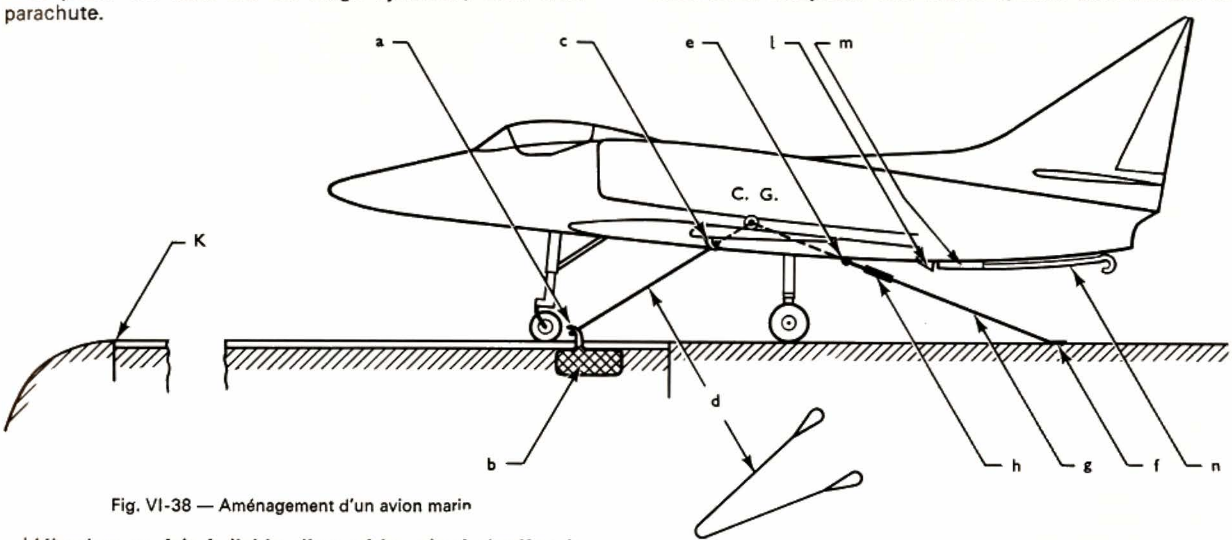


Fig. VI-38 — Aménagement d'un avion marin

fuselage, permet d'attacher l'avion à un point fixe du pont *f* au moyen d'un « câble de retenue » (*hold-back*) *g*. Ce câble comporte une pièce de rupture *h*, calculée de façon à ne se rompre qu'au moment où la force de traction de la catapulte atteint sa valeur maximale. Ce dispositif est cause d'un départ assez brusque de l'avion, mais supprime le temps mort correspondant au passage de la traction de la catapulte d'une valeur nulle à son maximum. On remarque que les directions de l'élingue *d* et du câble de retenue *g* passent par le centre de gravité de l'avion *C.G.*, pour ne pas créer de moments secondaires. La partie mobile de la catapulte est freinée et arrêtée à l'extrémité du pont d'envol *K*, où l'élingue *d* se détache automatiquement des crochets *a* et *c*, en libérant l'avion.

12.2.2. L'appontage. — Une crosse *n* (V. fig. VI-38) articulée à l'avant en *l*, dotée d'un amortisseur *m* et d'un crochet est fixée sous la partie arrière du fuselage. En vol elle est maintenue relevée. À l'approche du pont du bateau, elle

L'éjection se fait à l'aide d'un vérin, placé derrière le siège, et constamment maintenu sous pression. Pour s'éjecter le pilote tire avec les deux mains sur une poignée placée au-dessus de sa tête et rabat sur son visage un rideau souple de protection. Cette manœuvre fait larguer, en premier lieu, la verrière et ensuite éjecte violemment le siège avec le pilote, dans une direction parallèle à son dossier. Cette éjection est assez forte, pour l'éloigner suffisamment de l'avion en détresse. Ensuite, un appareillage automatique sépare le pilote de son siège, en déployant un premier petit parachute attaché au siège. C'est alors seulement que se déploie le parachute du pilote.

Dans les nouvelles versions les sièges sont conçus de telle façon qu'il n'est plus nécessaire de larguer la verrière : le siège, avec le pilote, traverse la verrière en brisant le plexiglas, ce qui supprime des liaisons compliquées, et diminue le temps nécessaire pour effectuer l'éjection.

Cette éjection peut être faite à partir d'un avion roulant au sol, et même, dans les derniers modèles,



Fig. VI-39 — Appontage d'un avion « Jaguar M » sur le pont d'un porte-avion (*Bréguet Aviation*)

est libérée et pend presque verticalement (fig. VI-39). La partie du pont où doit s'effectuer le contact d'appontage est garnie d'un certain nombre de câbles d'acier, tendus transversalement à une hauteur de quelques centimètres au-dessus de la surface d'atterrissage. Les deux extrémités de chaque câble passent sur des tambours tournants, munis de freins. À l'appontage, la crosse accroche un de ces câbles et arrête l'avion assez brutalement, sur une distance très courte.

13. AMÉNAGEMENT DES AVIONS « CARGOS »

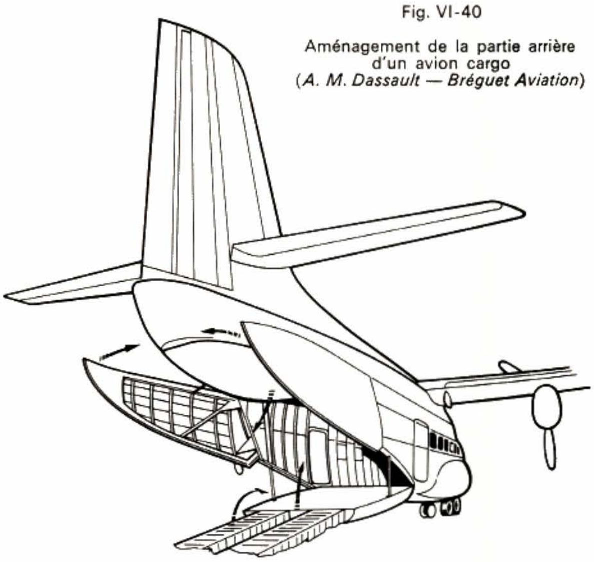
13.1. Transport de matériel. — L'accès de la soute de ces avions (la totalité de l'intérieur du fuselage constituant cette soute) se fait, sauf exception, par l'arrière, où sont aménagées des rampes d'accès pour véhicules motorisés. Les figures VI-40 et VI-41 représentent les modes de réalisations les plus courantes. Deux portes latérales s'ouvrent en pivotant autour de charnières placées le long de leurs arêtes avant, ou de celle des bords supérieurs. Une partie de la pointe arrière du fuselage se relève vers le haut pour dégager toute la hauteur de la soute. Ensuite, une rampe intégrée pivote, autour de son bord avant, jusqu'au contact avec le sol. À ce moment, on accroche des allonges, l'ensemble réalisant une pente acceptable pour une montée ou une descente de véhicule.

Pour diminuer encore davantage cette pente, on raccourcit, parfois partiellement, la hauteur du train principal, ce qui incline le plancher de la soute, en approchant du sol le point d'articulation de la rampe.

On peut également arrêter le mouvement de la rampe en position horizontale, au niveau de la plate-forme d'un camion, ce qui permet de faire passer le chargement directement du camion à la soute (ou inversement). Dans l'avion, le matériel est arrimé au moyen de chaînes, fixées à des anneaux installés le long du plancher.

Fig. VI-40

Aménagement de la partie arrière d'un avion cargo
(*A. M. Dassault — Bréguet Aviation*)



L'ouverture des portes peut se faire également en vol, ce qui permet un largage de charges qui sont éjectées vers l'arrière équipées de petits parachutes auxiliaires. Leur descente est ensuite freinée par l'ouverture d'un ou plusieurs parachutes principaux de sustentation.

La figure VI-42 représente un cas exceptionnel de chargement supplémentaire par l'avant : la pointe avant du fuselage du Lockheed C 5-A Galaxy se relève vers le haut ; une rampe intégrée complète cette installation.

13.2. Transport de troupes. — Tout au long des parois de la soute sont installés des sièges simples (toile sur châssis

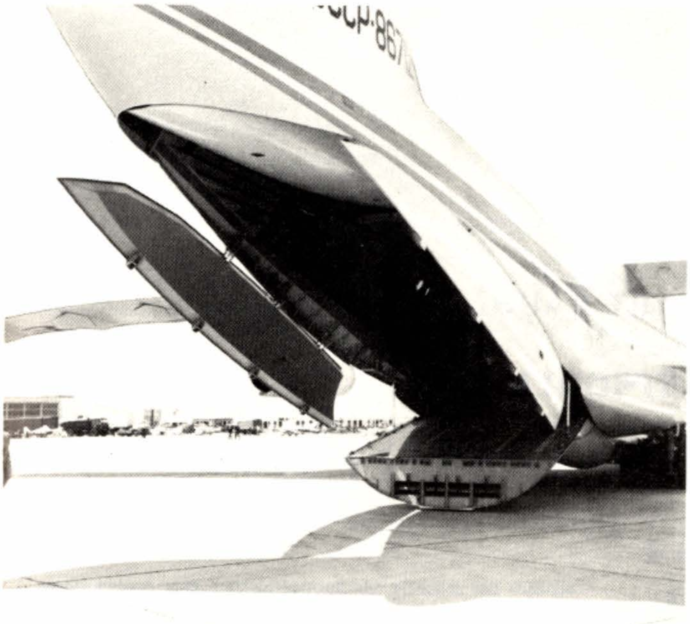


Fig. VI-41 — Partie arrière d'un Ilyouchine
(*CÉDOCAR*)



Fig. VI-42 — Partie avant d'un Lockheed C.5 A « Galaxy »
(*CÉDOCAR*)

en tubes) souvent repliables, pour pouvoir passer rapidement à un transport de matériel. Dans les avions plus importants on installe, en outre, une ou deux doubles rangées de ces sièges dans la partie centrale du fuselage.

Après l'atterrissage, les troupes peuvent être débarquées par la rampe arrière. On peut procéder également à un parachutage en vol, sans ouvrir l'arrière du fuselage, mais en utilisant des portes latérales à l'arrière de la soute. Pour un saut groupé de plusieurs parachutistes, on installe le long du plafond de la soute un filin tendu, fixé à l'avant et à l'arrière. Ce filin permet d'accrocher les mousquetons montés aux extrémités de chacun des câbles d'ouverture automatique de parachute individuel. Le saut se fait dans l'ordre des mousquetons accrochés, qui peuvent glisser sur ce filin jusqu'à la ferrure arrière face à la porte du saut, où ils sont arrêtés. Après le saut, le câble se déroule depuis l'intérieur du sac du parachute, jusqu'au moment, où, tendu, il extrait le parachute et se détache, ensuite, automatiquement.

13.3. Transport de blessés. — Des séries de ferrures et de sangles permettent de fixer rapidement (dans le sens de la longueur de la soute) les brancards, en deux ou trois rangées superposées. On prévoit également des sièges pour des blessés légers, pour les médecins et pour les infirmiers ainsi qu'une armoire à pharmacie « d'urgence ». Une centrale d'oxygène avec un réseau de canalisations de distribution, fixées le long des parois, permet, en cas de nécessité, le branchement d'un masque pour chacun des blessés.

Certains avions civils sont prévus en versions « cargo », destinés au transport de charges aussi bien civiles que militaires. Le plancher de la cabine des passagers est, dans ce cas, renforcé et doté d'anneaux d'arrimage et de rouleaux encastrés, pour faciliter le déplacement des charges.

Le chargement se fait à travers une porte spécialement élargie, placée à l'avant du flanc gauche du fuselage. Des chariots-élévateurs sont utilisés pour hisser le chargement au niveau de ces portes.

CHAPITRE VII

HÉLICOPTÈRES

VTOL (A.D.A.V.) ET STOL (A.D.A.C.)

1. INTRODUCTION

L'amélioration des performances de vitesse, de charge marchande et de distance franchissable des avions s'est accompagnée, au cours de leur développement, d'une augmentation des longueurs de piste nécessaires à leur décollage et à leur atterrissage. L'idée s'est donc imposée d'orienter les recherches aéronautiques dans la voie du décollage et de l'atterrissage sur place ou sur piste très courte. L'usage a consacré les sigles anglo-saxons de VTOL *Vertical take-off and landing* - décollage et atterrissage vertical, A.D.A.V.) et STOL (*Short take-off and landing* - décollage et atterrissage court, A.D.A.C.), pour les appareils pouvant répondre à ces exigences. Les voies de recherches dans ce but ont été nombreuses et les efforts continus; à nos jours, seul l'hélicoptère, aéronef à voilure tournante, s'est imposé et a atteint le stade de l'utilisation pratique. C'est la raison pour laquelle, ce chapitre lui sera plus particulièrement consacré.

2. HISTORIQUE

On admet que le privilège d'avoir mis sur le papier pour la première fois un projet de machine volante tirant sa sustentation d'une hélice revient à Léonard de Vinci et l'on peut donc affirmer que l'idée de l'hélicoptère remonte au moins au XV[e] siècle.

Au XIX[e] siècle, des modèles réduits sont mis au point sans que le concept d'hélicoptère ne dépasse la curiosité de salon. Au début du siècle, les études théoriques se développent sous l'impulsion du colonel Renard et en 1907, Paul Cornu décolle à bord d'un appareil de sa conception. La même année, Louis Bréguet réalise la même performance. Les appareils et les vols se multiplient mais il faut attendre les travaux de l'Ingénieur espagnol Juan de La Cierva sur les autogires (machines proches de l'hélicoptère), pour que l'hélicoptère puisse se développer. La Cierva met au point entre 1930 et 1940 le moyeu articulé qui permet à un aéronef muni d'un rotor (hélicoptère ou autogire) le vol d'avancement. Dès lors les progrès sont rapides et, qu'il s'agisse de Focke et Achgelis en Allemagne ou de Sikorsky aux États-Unis d'Amérique, on parvient à réaliser des machines directement utilisables.

Le premier appareil à avoir été fabriqué en série est le Sikorsky R-4 aux États-Unis d'Amérique en 1942.

Dans les années 50, le développement de l'hélicoptère a été très rapide et des machines très réussies, comme le, Bell 47 G aux États-Unis d'Amérique et les Alouettes II et III en France, ont donné à cette nouvelle industrie un grand essor.

Actuellement, les grands constructeurs sont:

— aux États-Unis d'Amérique: Bell, Sikorsky, Vertol, Hughes, Kamann;
— en U.R.S.S.: Mil, Kamov;
— en Europe: Westland (Grande-Bretagne) et Aérospatiale (France).

3. NOTIONS THÉORIQUES

3.1. Fonctionnement d'un rotor d'hélicoptère. — La principale qualité de l'hélicoptère est de pouvoir se maintenir immobile dans l'air. Cette propriété, il la doit à l'hélice de grand diamètre qu'il comporte et que l'on nomme « rotor principal ». Le rotor est constitué de pales (leur nombre varie selon les appareils, en général de deux à six) et d'un moyeu dont la conception est une particularité de l'hélicoptère. Comme on pourra le justifier plus loin, il est en effet nécessaire de lier les pales au moyeu par des articulations. Il s'ensuit une complication mécanique qui est l'une des premières caractéristiques de l'hélicoptère.

Dans la plupart des appareils en service actuellement, les pales, qui constituent la voilure tournante, sont articulées selon trois axes (fig. VII-1) : battement, traînée et pas.

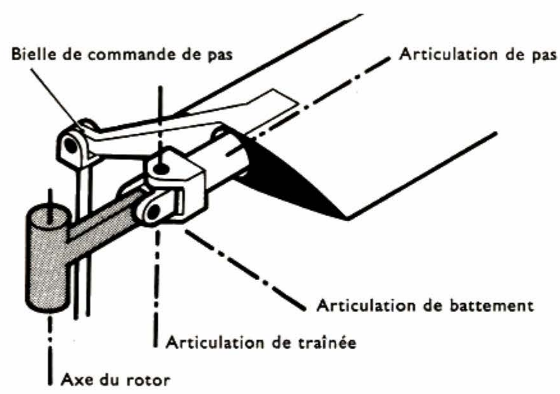


Fig. VII-1 — Principe du moyeu d'hélicoptère

A priori, on pourrait penser que les efforts aérodynamiques de portance risquent de replier le « rotor » comme un parapluie; en fait, une simple évaluation de la force d'inertie centrifuge montre qu'elle est largement prépondérante et « tend » la pale à la manière d'un système de haubans (la force centrifuge vaut vingt à trente fois l'effort de portance).

3.2. Le vol stationnaire. — Le mouvement du rotor permet d'assurer la portance de l'appareil immobile dans l'air. Dans le cas où le rotor est mû par l'action d'un moteur à pistons ou d'une turbine il est nécessaire de compenser le couple fourni par le système moteur afin que la cellule de l'appareil ne soit pas amenée, par réaction, à tourner en sens contraire. On verra ultérieurement que ce n'est pas toujours le cas, et que ce dernier phénomène est inexistant pour les appareils à rotor mûs par réaction.

Pour compenser le couple du rotor principal on dispose d'un petit rotor, à la queue de l'appareil, dont le plan de rotation est perpendiculaire à celui du rotor principal

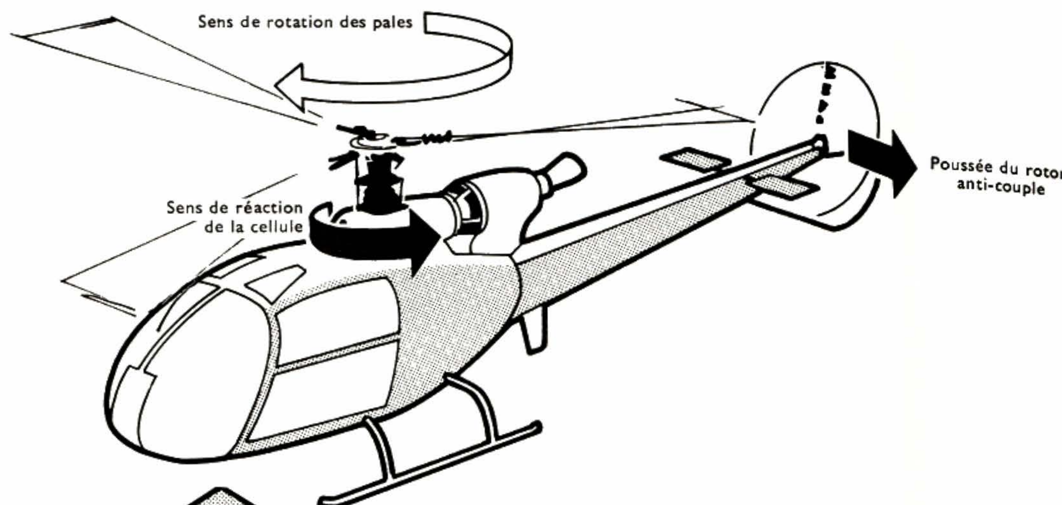


Fig. VII-2

Compensation du couple de rotor

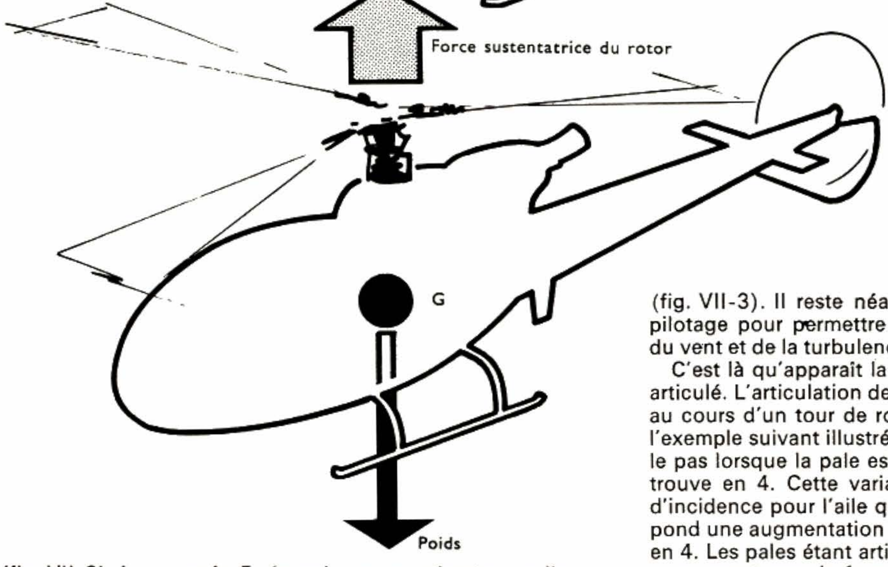


Fig. VII-3

(fig. VII-2). La poussée F_A fournie par ce petit rotor que l'on nomme rotor « anti-couple » doit vérifier la relation :

$$C = l \cdot F_A$$

C : moment du couple moteur du rotor principal.
l : distance des axes des deux rotors.

On montre que la puissance nécessaire en vol stationnaire pour sustenter un poids F_N est :

$$P = \frac{1}{f} \frac{(f_N)^{3/2}}{\sqrt{2 \rho S}}$$

en exprimant :

— la puissance P en watts,

— le poids sustenté f_N en newtons,

— la surface S du disque du rotor principal en mètres carrés,

— la masse volumique ρ de l'air en kilogrammes par mètre cube (1,225 kg/m^3).

Le coefficient f est appelé « qualité sustentatrice » du rotor ou « chiffre de mérite ».

Cette relation montre que l'on a intérêt à donner un diamètre aussi grand que possible au rotor, et justifie les configurations adoptées par les constructeurs. À titre d'exemple, une machine de 2 000 kg de masse totale aura un diamètre de rotor principal de 10 mètres environ. Le « chiffre de mérite » f est généralement compris entre 0,6 et 0,8 pour les rotors actuels.

On conçoit donc aisément qu'il soit possible d'assurer la sustentation d'un appareil à l'aide d'un rotor ; on peut même penser que l'appareil se trouvera en conditions particulièrement satisfaisantes d'équilibre stable du fait que le centre de traction est situé au-dessus du centre de gravité (fig. VII-3). Il reste néanmoins à lui trouver un moyen de pilotage pour permettre les manœuvres et contrer les effets du vent et de la turbulence atmosphérique.

C'est là qu'apparaît la nécessité de disposer d'un moyeu articulé. L'articulation de pas permet de commander celui-ci au cours d'un tour de rotor. On va le constater à l'aide de l'exemple suivant illustré par la figure VII-4 a. On augmente le pas lorsque la pale est en 2, on le diminue lorsqu'elle se trouve en 4. Cette variation de pas est une modification d'incidence pour l'aile que constitue la pale et il lui correspond une augmentation de portance en 2 et une diminution en 4. Les pales étant articulées en battement et les effets se composant avec la force d'inertie centrifuge, tout se passe comme si le disque que constitue le rotor avait été incliné d'un angle θ ; par rapport à la situation primitive, « la variation cyclique de pas » aboutit à la création, en plus de la force de sustentation, d'une force de propulsion, située vers l'avant dans l'exemple illustré ici (fig. VII-4 b).

On pourra alors tirer parti de cette nouvelle force pour contrer la turbulence ou amorcer un mouvement de translation vers l'avant. La commande qui permet d'obtenir cet effet porte le nom de « commande de variation cyclique de pas ».

3.3. Le vol en translation. — Il est possible d'utiliser l'effet de variation cyclique du pas pour obtenir une composante de traction du rotor principal. L'appareil va se trouver alors légèrement incliné vers l'avant, ce que l'on peut constater aisément en observant un hélicoptère en vol. En analysant le champ de vitesses auquel se trouvent soumises les pales du rotor on voit que chaque section de pale est soumise à deux composantes de vitesse. La première résulte du mouvement de rotation du rotor et est fonction du rayon auquel se trouve la section de pale : elle est égale à ωr si ω est la vitesse de rotation en radians par seconde et si r est le rayon de la section considérée en mètres (fig. VII-5 a). La seconde a pour origine le mouvement de translation de vitesse V. Comme le montre la figure, si en A les deux composantes s'ajoutent, en B elles se retranchent, et les portances en A et B sont donc différentes ; l'appareil se trouve soumis à un couple supplémentaire qui tend à faire passer l'appareil sur le dos dans le cas où le rotor n'est pas articulé. C'est ce qui se produisit d'ailleurs aux débuts de l'hélicoptère, avant que Juan de La Cierva n'invente le

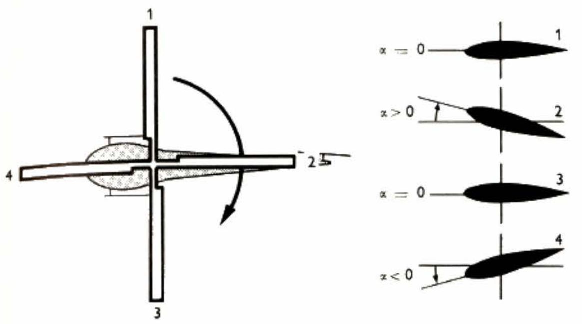


Fig. VII-4 a — Commande cyclique de pas (α, angle compté à partir des positions 1 et 3)

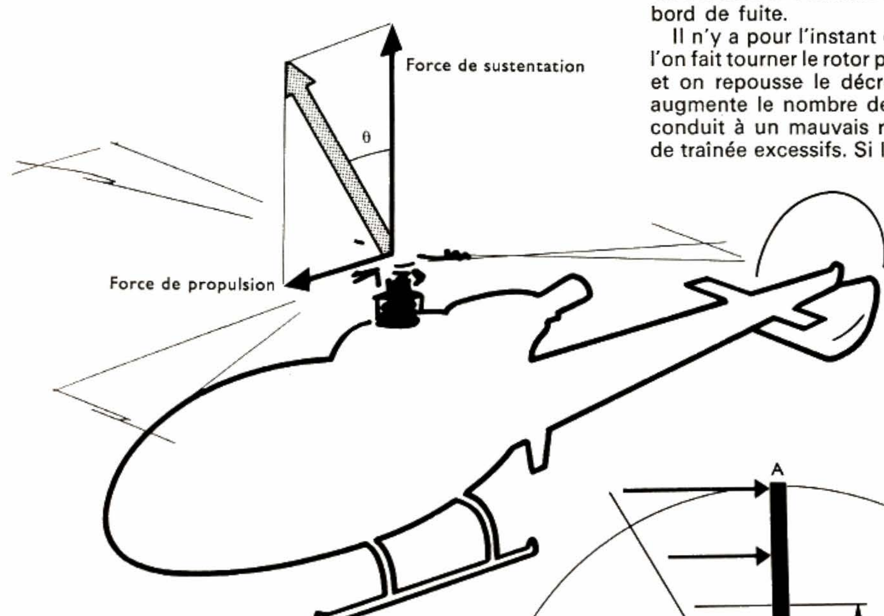


Fig. VII-4 b

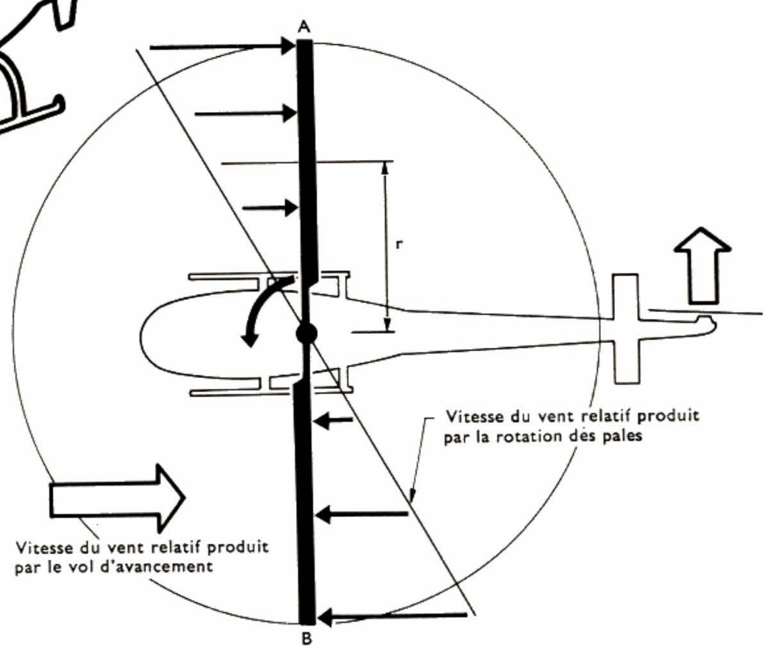


Fig. VII-5 a

Effet du vol d'avancement sur la vitesse du vent relatif auquel sont soumises les pales

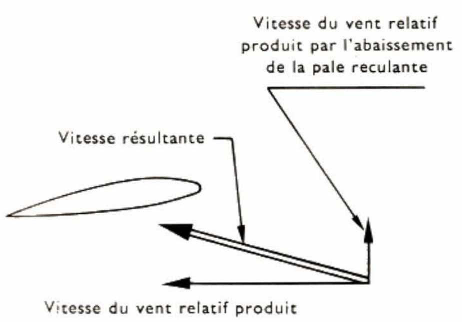


Fig. VII-5 b

moyeu qui porte son nom. Dans le cas où les pales sont articulées sur le moyeu selon l'axe de battement, la pale qui porte le plus s'élève, celle qui porte le moins s'abaisse et ces deux mouvements sont stables car la montée et la descente des pales au cours de leur révolution jouent comme des variations d'incidence (fig. VII-5 b). La pale soumise à la plus grande vitesse est dite « avançante » car sa vitesse de rotation est dans le sens de la vitesse de translation, la pale soumise à la plus petite vitesse est dite « reculante ».

On touche ici à un problème crucial pour le développement de l'hélicoptère. Le mouvement d'abaissement de la pale dite « reculante » correspond à une augmentation de l'incidence aérodynamique, et le «décrochage» en constitue une limite (V. chap. 4). Par ailleurs, la pale « avançante », soumise à la vitesse la plus grande, peut atteindre un nombre de Mach tel que sa traînée devienne prohibitive (les profils d'aile, et la pale en est un, voient en effet leur traînée augmenter fortement au voisinage de Mach 1).

Par exemple, un appareil volant à 360 km/h et ayant une vitesse périphérique en bout de pale de 200 m/s aura son extrémité de pale avançante à une vitesse de 300 m/s, soit au niveau du sol à un nombre de Mach de 0,9 et son extrémité de pale reculante à 100 m/s. Par ailleurs, sur la pale dite reculante, à mi-rayon de rotor, la vitesse sera nulle, entre ce point et le moyeu, le profil de pale sera soumis à un écoulement inverse c'est-à-dire qu'il sera attaqué par le bord de fuite.

Il n'y a pour l'instant guère de solution à ce problème. Si l'on fait tourner le rotor plus vite, on limite la zone d'inversion et on repousse le décrochage de pale reculante mais on augmente le nombre de Mach de la pale avançante ; cela conduit à un mauvais rendement du rotor et à des efforts de traînée excessifs. Si l'on ralentit le rotor, on diminue son aptitude à la portance en augmentant la zone d'inversion. Pour l'instant, il semble donc que le domaine de vitesses de l'hélicoptère se situe en dessous de 400 km/h.

Du point de vue du pilotage, l'hélicoptère possède en translation beaucoup de caractères communs avec l'avion. Un manche à balai commande le pas cyclique qui assure, comme on l'a vu précédemment, le contrôle en roulis et tangage de l'appareil. Le contrôle en lacet est fourni par deux pédales comme sur un avion, mais ici les pédales font varier la poussée du rotor anti-couple.

La seule commande originale est le levier de pas général qui permet de faire varier la poussée du rotor principal (force de sustentation). Ce levier peut être muni d'une

poignée tournante qui sert de manette des gaz au moteur. Le pilote doit alors conjuguer toute augmentation de poussée avec une augmentation de puissance du moteur s'il veut garder constant le régime du rotor. Beaucoup d'appareils modernes à turbines possèdent un système automatique de régulation qui rend inutile la poignée de gaz.

3.4. Autorotation. — Tel qu'il a été décrit jusqu'à présent, l'hélicoptère semble un aéronef incapable de poursuivre son vol en l'absence de puissance motrice. Fort heureusement, le rotor possède la propriété de pouvoir assurer une sustentation à condition d'être soumis à une vitesse de descente convenable, à la manière d'un planeur.

Ce régime de fonctionnement s'appelle «l'autorotation» et s'explique par le fait que, dans certaines conditions de pas et de vitesse verticale, la résultante aérodynamique possède, dans les axes liés à la pale, une composante tractrice qui garantit un mouvement de rotation uniforme du rotor (fig. VII-6).

En cas de panne motrice, le pilote doit réduire rapidement le pas général de l'appareil et descend ainsi avec ou sans mouvement de translation ; au voisinage du sol il augmente le pas général, ce qui annule momentanément sa descente mais fait tomber le régime rotor, car ce dernier n'est plus entraîné par le moteur.

En pratique, l'atterrissage en autorotation est une manœuvre délicate qui exige un bon entraînement et requiert une bonne part du temps de formation des pilotes. L'hélicoptère possède ainsi la possibilité de l'atterrissage dans un faible espace même en cas de panne moteur.

4. DESCRIPTION ET PERFORMANCES

4.1. Description. — Pour se familiariser avec l'hélicoptère, ses problèmes et ses possibilités, on peut examiner les éléments constitutifs de l'appareil léger (fig. VII-7).

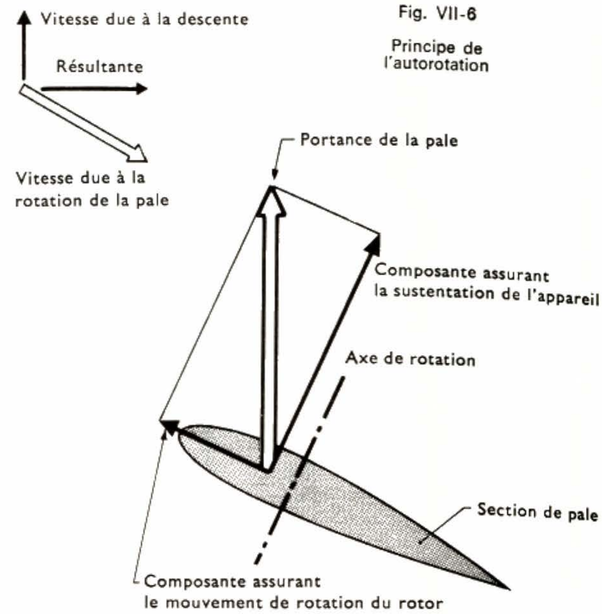


Fig. VII-6
Principe de l'autorotation

4.1.1. Le moteur. — De nos jours, c'est le plus souvent un turbomoteur à grand régime de rotation et à rapport de la puissance à la masse élevée. Pour un appareil d'une masse de 2 000 kg la puissance est voisine de 500 ch (368 kW).

4.1.2. La boite de transmission principale. — Il s'agit d'un réducteur qui permet de passer du régime moteur (élevé) au régime rotor, situé entre 300 et 400 tours par minute, et qui, par conséquent, doit transmettre des couples très grands tout en restant léger.

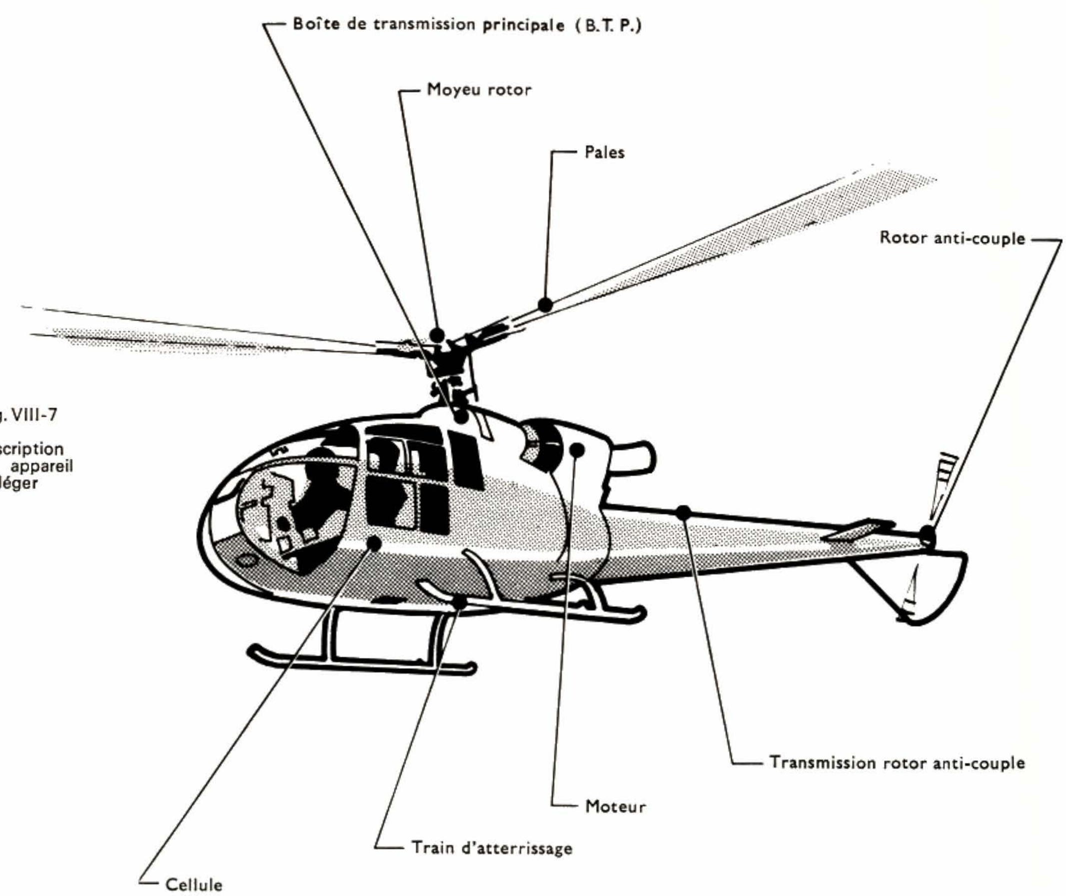


Fig. VIII-7
Description d'un appareil léger

4.1.3. Le moyeu et les pales. — Le moyeu est complexe à cause des trois articulations et des commandes de pas (général et cyclique).

4.1.4. L'arbre de transmission arrière et le rotor anti-couple. — Il s'agit d'un rotor simplifié avec commande de pas général seulement pour faire varier sa poussée.

4.1.5. La cellule. — Elle est extrêmement légère avec habitacle transparent indispensable pour une bonne visibilité vers le bas.

4.1.6. Le train d'atterrissage. — Il peut être constitué de patins ou de roues.

4.2. Technologie. — Pour simplifier l'exposé des principes de fonctionnement de l'hélicoptère, un seul type d'appareil a été examiné : un appareil monorotor à transmission mécanique. Il existe aussi des appareils birotors en tandem ou côte à côte ; dans ce cas, les deux rotors principaux ne tournent pas dans le même sens et le petit rotor anticouple est inutile. C'est le cas, par exemple, du Mil Mi-12 soviétique, actuellement le plus gros hélicoptère du monde.

Par ailleurs, le rotor peut être entraîné par réaction ; dans ce cas, les pales creuses sont équipées d'un conduit qui achemine de l'air ou des gaz de combustion à leur extrémité. Comme le montre la figure VII-8, le rotor tourne en sens inverse à celui de l'éjection des gaz. Le rotor anti-couple est ici également inutile, car aucun couple n'étant transmis au rotor, il n'y a aucune réaction sur la cellule.

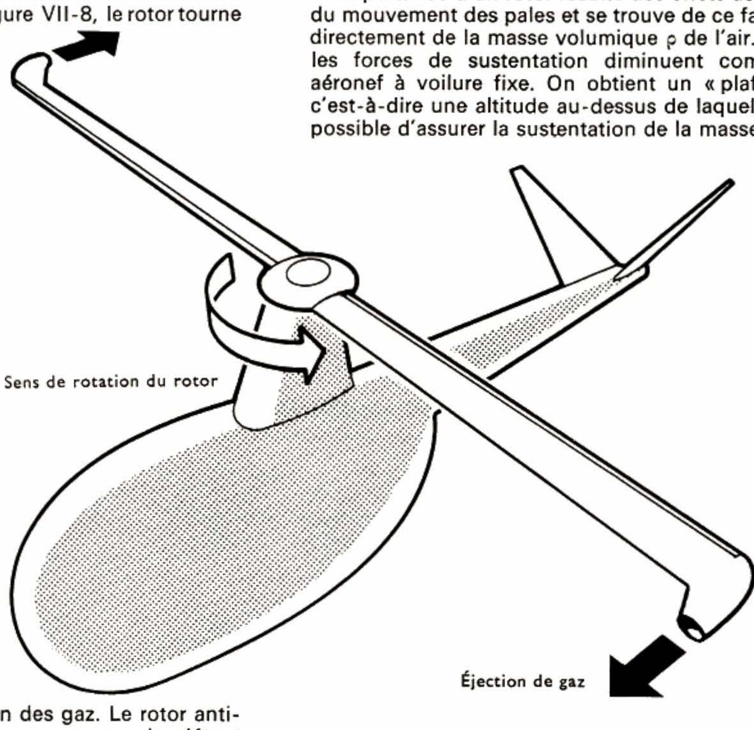


Fig. VII-8

Principe de l'hélicoptère à réaction

L'hélicoptère à réaction a pour avantage la simplicité, il n'y a ni boîte de réduction, ni rotor anti-couple ; cependant, il n'est guère en faveur actuellement à cause de son mauvais rendement.

En ce qui concerne les moyeux, les articulations dont on a précédemment précisé le caractère essentiel tendent à disparaître dans les nouveaux appareils. On réalise des moyeux dits « rigides », c'est-à-dire où l'articulation est remplacée par une zone souple de façon à éviter la complication de construction et de maintenance de ces articulations.

La mise au point des moyeux « rigides » est relativement lente, mais déjà des appareils comme le Bölkow 105 (République fédérale allemande) et le WG 13 (Grande-Bretagne) volent avec des moyeux sans articulations de battement ni de traînée.

Toutes les pièces constitutives d'un hélicoptère sont soumises à des vibrations intenses qui ont pour origine le rotor. Les pales en particulier sont soumises à des efforts alternés au cours de leur rotation en vol d'avancement. Il s'ensuit que le critère de dimensionnement est le plus souvent la tenue du matériau aux efforts de « fatigue » c'est-à-dire aux sollicitations alternées. On est ainsi conduit à fixer une « durée de vie » de la pale au-delà de laquelle sa résistance aux vibrations n'est plus assurée. Très récemment, la mise au point et l'utilisation de matériaux plastiques ont permis de réaliser des pales de durée de vie infinie (c'est le cas des pales de la « Gazelle »).

4.3. Les performances

4.3.1. Vol stationnaire. — On attend essentiellement d'un hélicoptère une bonne aptitude au décollage et à l'atterrissage sur une surface réduite et il est évident que la performance qui revêt le plus d'importance est la valeur de la masse décollable.

Il y a lieu de distinguer à ce propos deux configurations de vol stationnaire. La première appelée vol stationnaire *dans l'effet de sol* consiste à maintenir l'appareil en dessous d'une hauteur de l'ordre du diamètre du rotor. L'interaction de l'écoulement de l'air induit par le rotor avec le sol est alors bénéfique et accroît la force de sustentation de ce dernier. La seconde configuration consiste à maintenir l'appareil *hors de l'effet de sol* et la force de sustentation dans ce cas est moindre.

La portance d'un rotor résulte des effets aérodynamiques du mouvement des pales et se trouve de ce fait dépendante directement de la masse volumique ρ de l'air. Si ρ diminue, les forces de sustentation diminuent comme pour un aéronef à voilure fixe. On obtient un « plafond » de vol, c'est-à-dire une altitude au-dessus de laquelle il n'est plus possible d'assurer la sustentation de la masse de l'appareil.

Pour un hélicoptère il y a donc deux « plafonds » en vol stationnaire. Le plus élevé correspond à un vol « dans l'effet de sol », en montagne par exemple ; le moins élevé à un vol hors effet de sol. Il existe même un troisième « plafond » correspondant au vol d'avancement mais sa définition nécessite quelques précisions supplémentaires quant à la puissance nécessaire au vol de l'hélicoptère.

4.3.2. Vol d'avancement. — Comme il a été exposé précédemment, le vol d'avancement est obtenu en basculant le plan du rotor vers l'avant à l'aide de la commande cyclique de pas et en créant ainsi deux forces, l'une qui sustente le poids de l'appareil, l'autre qui s'oppose à la résistance aérodynamique du fuselage et du rotor en mouvement. La théorie montre, et l'expérience le confirme, que la puissance nécessaire à la *sustentation* décroît avec la vitesse d'avancement comme il est indiqué (fig. VII-9).

En revanche, la résistance aérodynamique ou *traînée* du rotor et du fuselage croît fortement avec la vitesse. La puissance résultante, somme des deux termes explicités précédemment, présente donc un minimum comme le

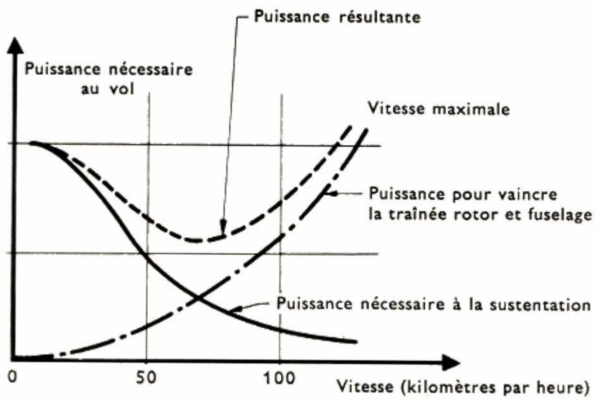


Fig. VII-9

montre la figure VII-9. Pour un appareil déterminé il existe donc une vitesse pour laquelle la puissance nécessaire au vol est minimale et inférieure à celle du vol stationnaire. On conçoit donc qu'il existe un troisième « plafond » qui correspond au vol d'avancement et qui est supérieur aux deux autres. La courbe de puissance nécessaire au vol nous montre de plus le point de vitesse maximale compte tenu de la puissance installée. La description du fonctionnement du rotor a montré que, par principe, l'hélicoptère paraît aujourd'hui limité en vitesse. Pour s'en convaincre il suffit d'examiner les performances de vitesses obtenues lors des records mondiaux absolus.

1963 : Sud-Aviation, Super Frelon, 351 km/h.

1970 : Sikorsky S-67 Blackhawk, 355,5 km/h.

On note que de nombreuses années d'efforts ont été nécessaires pour gagner quelques kilomètres par heure.

5. VTOL OU A.D.A.V. (AVION À DÉCOLLAGE ET ATTERRISSAGE VERTICAL)

Parallèlement au développement de l'hélicoptère, le domaine du vol vertical a été exploré dans d'autres directions. Les plus fructueuses se sont révélées être les suivantes :

— Les appareils à hélices ou rotors basculants, appelés plus généralement « convertibles ».

— Les appareils utilisant des turboréacteurs de sustentation.

Le principe des convertibles est le suivant : l'appareil, le plus souvent bimoteur, possède des rotors qui sont disposés comme sur un hélicoptère pour le décollage et l'atterrissage, c'est-à-dire qu'ils ont leur axe de rotation vertical. Après l'envol, l'appareil accélère jusqu'à ce qu'il ait atteint une vitesse suffisante. Ses ailes lui permettent alors, à elles seules, de voler et les rotors sont alors basculés pour redonner à l'appareil la configuration d'un avion (fig. VII-10). L'axe des rotors étant horizontal, il n'y a plus de difficulté pour l'appareil dans le domaine des grandes vitesses d'avancement (tout au moins tant qu'elles restent subsoniques), contrairement à ce que l'on a exposé pour l'hélicoptère. On conçoit que pour un convertible la partie délicate du vol soit la « conversion », passage du vol avion au vol hélicoptère. Dans cette phase de vol, les rotors sont attaqués obliquement par l'écoulement de l'air : il en résulte un fort mouvement de battement des pales et, de plus, la stabilité est plus difficile à assurer. Par ailleurs, les nécessités du vol stationnaire imposent des diamètres de rotors relativement importants et des pales faiblement vrillées (comme pour l'hélicoptère). Au contraire, le vol en configuration avion nécessite des rotors de diamètre modéré et de fort vrillage. Un compromis doit être recherché pour obtenir des rendements acceptables dans tous les cas de vol. Une autre difficulté réside dans le fait que les appareils de ce type sont birotors et multimoteurs et, par conséquent, il est indispensable d'interconnecter mécaniquement les moteurs et rotors pour prévenir l'éventualité d'une panne. Ainsi, pour un bimoteur, en cas de panne de l'un des moteurs, la puissance restante est répartie également entre les deux rotors.

Le premier appareil convertible à avoir réussi le vol de conversion est le Bell X. V3 aux États-Unis d'Amérique en 1958.

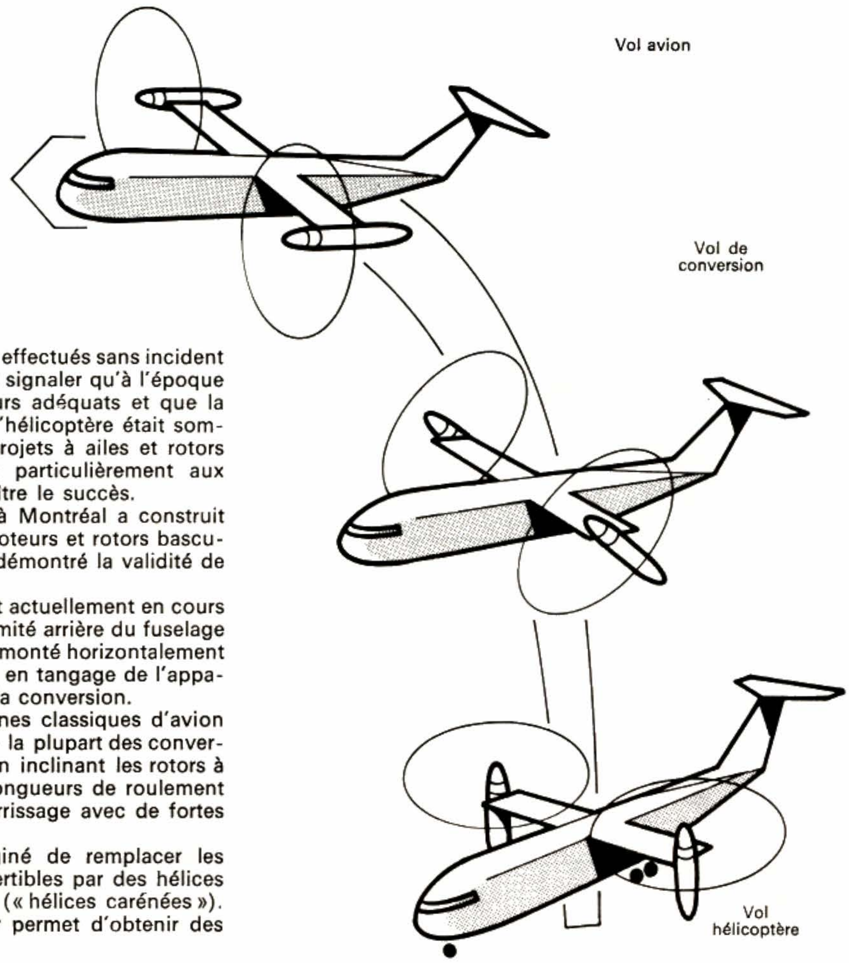
Hélicoptères légers et moyens

	Hughes 500 (États-Unis d'Amérique)	Bell « Jet Ranger II » (États-Unis d'Amérique)	Aérospatiale Westland « Gazelle » (France)	Aérospatiale SA 360 (France)	Bölkow BO 105 (République fédérale allemande)	Westland WG 13 (Grande-Bretagne)
Masse (kilogrammes) :						
— à vide	500	660	880	1 350	1 070	2 400
— maximale	1 150	1 450	1 800	2 700	2 100	3 800
Diamètre du rotor (mètres) :	8,03	10,16	10,50	11,50	9,82	12,80
Vitesse (kilomètres par heure) :						
— croisière	220	190	240	275	250	260
— maximale	244	225	300	310	220	300
Plafond stationnaire (mètres) :						
— HES (1)	1 600	1 800	2 800	2 800	1 500	3 600
— DES (2)	2 500	3 400	3 200	3 300	2 300	—
Puissance moteur (chevaux)	278	317	590	980	2 × 317	2 × 830
kilowatts	205	233	434	721	233	610
	Allison	Allison	Turbomeca	Turbomeca	Allison	Rolls-Royce
Nombre de places	4	5	5	10	5	12
Distance franchissable (kilomètres)	600	620	670	600	600	800

(1) HES : hors effe de sol (2) DES : dans l'effet de sol

Fig. VII-10

Principe du convertible



Plus d'une centaine de vols furent effectués sans incident mais le projet fut abandonné. Il faut signaler qu'à l'époque on ne disposait pas de turbomoteurs adéquats et que la technologie elle-même des rotors d'hélicoptère était sommaire. Par la suite, de nombreux projets à ailes et rotors basculants furent construits, tout particulièrement aux États-Unis d'Amérique, sans connaître le succès.

Au Canada, la société Canadair à Montréal a construit un convertible, le CL. 84, à ailes, moteurs et rotors basculants (fig. VII-11) qui a largement démontré la validité de la formule.

Plusieurs appareils de ce type sont actuellement en cours d'évaluation. On remarque, à l'extrémité arrière du fuselage de l'appareil canadien, un petit rotor monté horizontalement (axe vertical) qui assure le contrôle en tangage de l'appareil aux basses vitesses et pendant la conversion.

Aux grandes vitesses, les gouvernes classiques d'avion sont suffisantes. Le CL. 84, comme la plupart des convertibles, est utilisé aussi en STOL; en inclinant les rotors à 45° environ, on peut obtenir des longueurs de roulement très faibles au décollage et à l'atterrissage avec de fortes accélérations ou décélérations.

Certains constructeurs ont imaginé de remplacer les rotors de grand diamètre des convertibles par des hélices dotées d'un carénage périphérique (« hélices carénées »). Le carénage en forme de diffuseur permet d'obtenir des

Hélicoptères lourds

	« Puma » Westland Aérospatiale (Grande-Bretagne; France)	« Super Frelon » Aérospatiale (France)	S. 61 Sikorsky (É.-U.A.)	CH. 53 Sikorsky (É.-U.A.)	Mi. 6 Mil (U.R.S.S.)	Mi. 12 Mil (U.R.S.S.)
Masse (kilogrammes) :						
— à vide	3 358	6 740	5 348	10 000	27 240	70 000
— maximale	6 700	13 000	8 620	19 000	40 500	105 000
Diamètre du rotor (mètres)	15	18,90	18,90	22,0	35	35 × 2
Vitesse (kilomètres par heure) :						
— croisière	265	241	225	278	250	240
— maximale	274	275	241	315	300	260
Plafond stationnaire (mètres) :						
— HES	1 300	1 500	1 190	2 000	—	—
— DES	2 150	2 120	2 700	4 000	—	—
Puissance moteur (chevaux)	2 × 1 575	3 × 1 630	2 × 1 500	2 × 2 850	2 × 5 500	4 × 6 500
kilowatts	1 158	1 198	1 104	2 095	4 043	4 778
	Turmo Turbomeca	Turmo Turbomeca	G.E. CT. 58	G.E. T. 64	Soloviev	Soloviev
Nombre de places	2 + 17 passagers	2 + 27 passagers	30	38	30	50

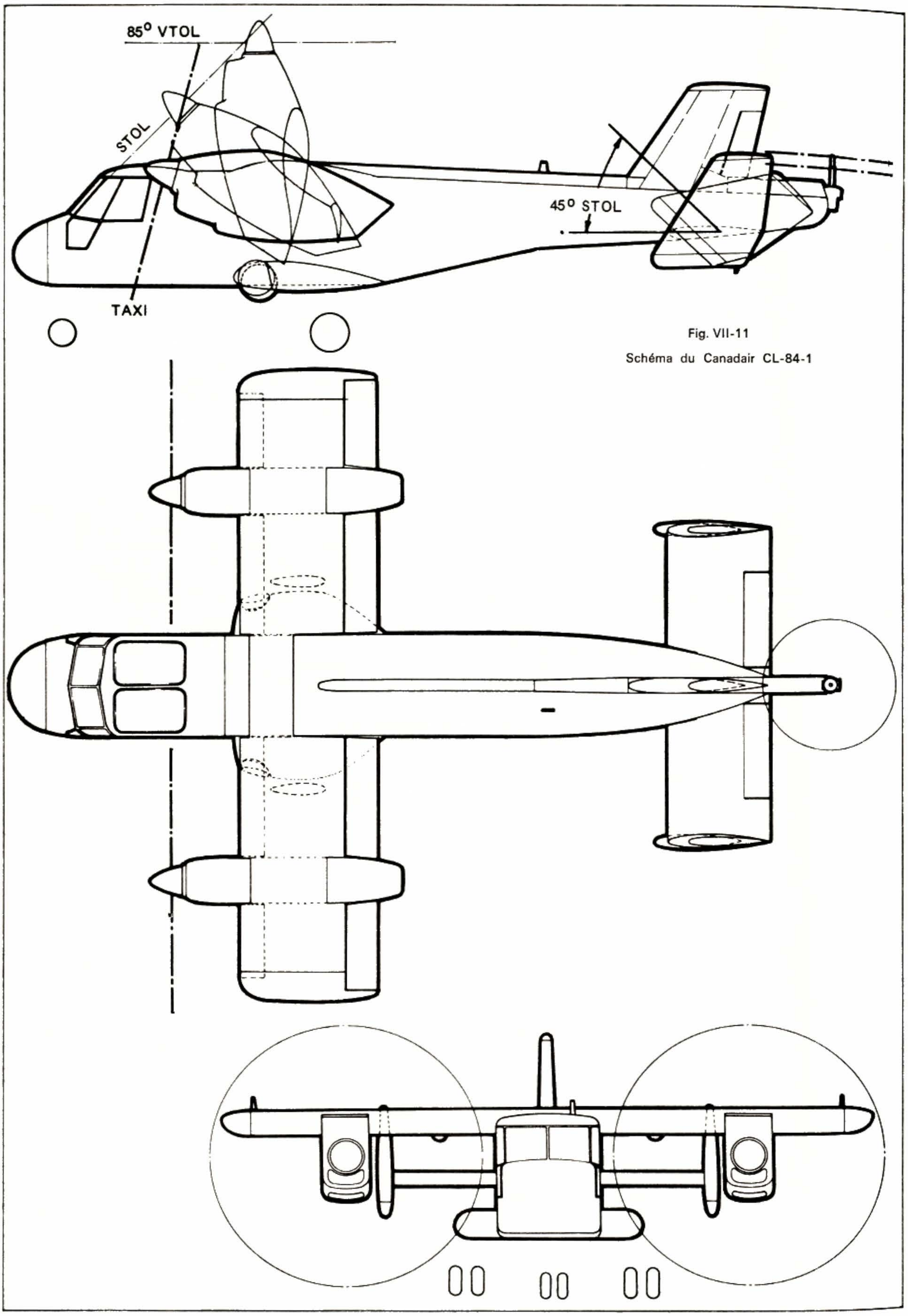


Fig. VII-11

Schéma du Canadair CL-84-1

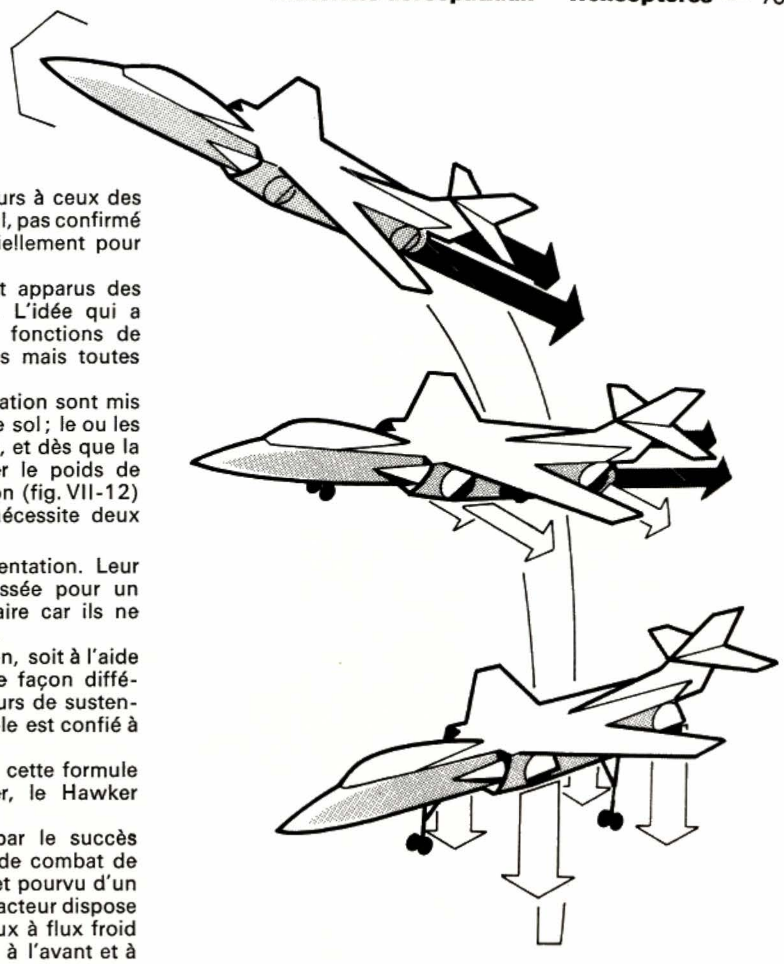


Fig. VII-12

Appareil à réacteurs de sustentation

poussées élevées avec des diamètres inférieurs à ceux des rotors non carénés. Les essais n'ont, en général, pas confirmé les espoirs placés dans cette formule, essentiellement pour des raisons de difficulté de pilotage.

Plus tardivement que les convertibles sont apparus des appareils à turboréacteurs de sustentation. L'idée qui a présidé à leur conception est simple. Les fonctions de sustentation et de propulsion sont séparées mais toutes deux assurées par des turboréacteurs.

Pour le décollage, les réacteurs de sustentation sont mis en route et permettent à l'avion de quitter le sol ; le ou les moteurs de propulsion entrent ensuite en jeu, et dès que la vitesse atteinte permet à l'aile de sustenter le poids de l'appareil, on coupe les moteurs de sustentation (fig. VII-12)

Pour être mis en pratique, ce principe nécessite deux acquis technologiques importants :

— la mise au point de moteurs de sustentation. Leur qualité essentielle doit être une forte poussée pour un faible poids ; la consommation est secondaire car ils ne fonctionnent en principe que peu de temps ;

— le contrôle en vol stationnaire de l'avion, soit à l'aide de tuyères orientables, soit en modulant de façon différentielle la poussée de plusieurs turboréacteurs de sustentation à tuyère fixe. Dans tous les cas, ce rôle est confié à un pilote automatique.

On peut citer de nombreux appareils dans cette formule parmi lesquels le « Mirage V », le Dornier, le Hawker Siddeley « Harrier ».

Ce dernier, qui semble seul couronné par le succès de la construction en série, est un appareil de combat de nature un peu différente. Il est monomoteur et pourvu d'un réacteur à double flux « Pégasus ». Le turboréacteur dispose de quatre tuyères orientables principales, deux à flux froid et deux à flux chaud. De petits jets, placés à l'avant et à l'arrière de l'appareil, permettent le contrôle de l'avion en vol stationnaire. Son premier vol remonte à 1960 et, au terme d'une dizaine d'années d'effort, on peut le considérer comme le seul appareil opérationnel de cette formule. Il a d'ailleurs fait l'objet d'une commande de la Royal Air Force anglaise et du Marines Corps des États-Unis d'Amérique. Pour l'instant, il faut préciser que l'avenir des appareils à sustentation par réacteurs reste limité aux chasseurs subsoniques.

Ces appareils sont encore fortement pénalisés par les caractères suivants :

— en cas de panne de moteur il n'y a aucune autre issue pour le pilote que d'utiliser son siège éjectable ;

— les fortes vitesses d'éjection engendrent un bruit intense et provoquent une érosion du sol accompagnée d'un nuage de poussière. Les nuisances qui en résultent ne sauraient être acceptées en utilisation civile ;

— leur autonomie reste encore très faible.

6. STOL OU A.D.A.C. (AVION À DÉCOLLAGE ET ATTERRISSAGE COURT)

Le décollage sur courte distance a été réalisé et est réalisé de nos jours par de nombreux avions, à commencer par la plupart des appareils de tourisme. Il ne sera donc pas de notre propos de citer tous les avions qui peuvent prétendre à des performances STOL. On s'attachera plutôt à décrire certains procédés éprouvés, ou encore au stade du développement, pour parvenir à des longueurs de roulement au décollage et à l'atterrissage relativement courtes. Le problème consiste à augmenter le coefficient de portance de la voilure de manière à autoriser le vol à faible vitesse. Les techniques mises en œuvre pour y parvenir sont groupées sous le nom *d'hypersustentation*. Dans ce but, les ailes sont munies de becs de bord d'attaque et de volets au bord de fuite, ce qui accroît notablement la force de sustentation (fig. VII-13). Les avions STOL doivent de plus posséder de bonnes performances d'accélération pour atteindre la vitesse nécessaire au vol en roulant le moins possible au décollage ; cela ne peut être obtenu qu'en augmentant la poussée des moteurs. La motorisation peut aussi intervenir dans le coefficient de portance par le biais des procédés de soufflage. L'expérience montre, en effet, qu'une voilure hypersustentée peut être fortement améliorée au point de vue portance si l'on souffle un jet d'air de faible débit au bord d'attaque ou au bord de fuite (fig. VII-14). L'obtention de ce soufflage n'est pas gratuite :

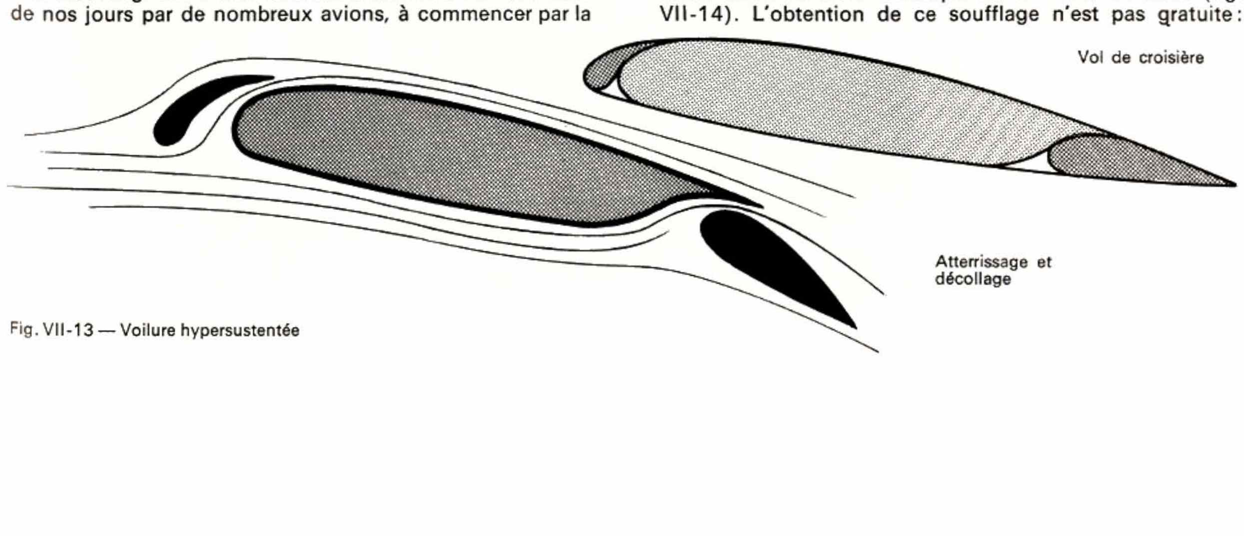


Fig. VII-13 — Voilure hypersustentée

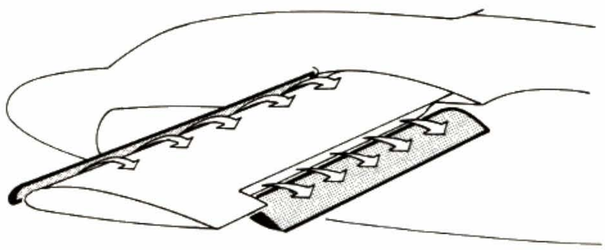


Fig. VII-14 — Hypersustentation avec soufflage

le plus souvent il s'agit d'air prélevé sur les compresseurs des turboréacteurs de l'appareil. La puissance de soufflage doit donc être prise en compte dans le bilan de rentabilité de l'appareil. Il convient de préciser qu'une augmentation simultanée de la surface de voilure, du coefficient de portance de cette dernière et de la poussée des moteurs ne conduit pas forcément à une longueur de décollage minimale. Une optimisation est nécessaire.

Plusieurs appareils STOL de petite taille et à hélices sont actuellement en service. Le De Havilland « Twin Otter » équipe notamment bon nombre de compagnies assurant des liaisons courtes. Il faut noter aussi la conception originale, mais malheureusement sans suite, du Bréguet 941 français. Cet appareil dispose de quatre hélices qui soufflent une voilure à volets fortement braqués. Le flux d'air ainsi défléchi assure une sustentation suffisante en dessous de 100 km/h. La portance provenant directement des hélices, celles-ci sont liées mécaniquement de sorte que la panne de l'un des quatre moteurs ne rompt pas la symétrie de l'écoulement aérodynamique sur la voilure. Actuellement, tous les grands constructeurs ont en projet des appareils à réaction de 200 passagers environ et à performances STOL. Cependant, en matière de transport aérien, le problème du STOL n'est plus un problème de technique aéronautique mais de politique des transports. Les villes laisseront-elles s'installer à leurs abords immédiats des aérodromes pour STOL à piste de 600 mètres ou moins ? C'est à cette seule condition que l'utilisation du STOL présentera pour les compagnies et les usagers de l'intérêt.



Sikorsky S.61
(*United Aircraft*)



Sikorsky CH. 53 *(United Aircraft)*

7. UTILISATION DES HÉLICOPTÈRES

7.1. Transport de passagers. — À la différence de l'avion, l'hélicoptère n'est pratiquement pas utilisé pour l'exploitation de lignes régulières de transport. Il est pénalisé dans ce type d'utilisation par son coût d'entretien élevé et sa vitesse relativement basse.

Plusieurs expériences ont eu lieu dans ce sens: d'abord, la compagnie belge Sabena a exploité des Sikorsky S.58 sur la ligne Paris-Bruxelles, puis Olympic Airways a utilisé aussi un Super Frelon pour la desserte des îles grecques. Ces différentes tentatives n'ont pas eu de suite et, actuellement, il n'existe plus que des lignes très courtes dans les grandes villes américaines qui relient le centre-ville à l'aéroport (par exemple: à l'aide de Sikorsky S.61 New York Airways transporte les passagers du building de la Panam à Kennedy-Airport).

L'équilibre financier de ce type d'activité est le plus souvent précaire.

7.2. Travail aérien. — Le travail aérien, sous ses multiples aspects, est un domaine où l'hélicoptère s'est imposé car il est le plus souvent irremplaçable. L'hélicoptère permet de déposer des charges en montage, au sommet des tours en construction et certains appareils ont été conçus pour jouer le rôle de grue volante. Dans ce cas, on ne s'intéresse plus qu'aux performances en vol stationnaire, à la stabilité et à la maniabilité, et l'on peut se contenter d'un dessin aérodynamique de fuselage très sommaire. À l'aide d'une élingue attachée sous l'appareil et à laquelle on accroche les charges, on peut réaliser de véritables ponts aériens dans les zones d'accès difficile. Dans ce type d'utilisation, l'hélicoptère est très économique, comparé aux autres moyens, et son rôle s'accroît de jour en jour. Le développement de la recherche pétrolière en mer fournit aussi un large domaine d'utilisation à l'hélicoptère. Qu'il s'agisse d'assurer la relève ou le ravitaillement des équipes de forage, la liaison par hélicoptère entre la base à terre et la plate-forme en mer est pratiquement constante.

Cette dernière utilisation nécessite des appareils de plus en plus gros pour des rayons d'action de plus en plus longs car les nouveaux sites de recherche sont de plus en plus éloignés des côtes.

Dans l'activité de travail aérien, il faut insérer l'hélicoptère dit « *executive* » qui permet à l'homme d'affaires de passer d'un bureau en pleine ville à une usine de province dans les meilleures conditions de rapidité en échappant aux aléas de la circulation urbaine, l'héliport pouvant être installé au sommet d'une tour, comme c'est déjà le cas aux États-Unis d'Amérique. Cependant, pour cette dernière utilisation, il faut noter que la distance à parcourir doit être inférieure à 500 km car l'hélicoptère est pénalisé par sa faible vitesse de croisière.

7.3. Traitement agricole. — Muni de rampes de pulvérisation, l'hélicoptère peut assurer l'épandage de produits de protection des récoltes. En Europe, il se prête mieux que l'avion à cette tâche car sa manœuvrabilité à faible vitesse lui permet de traiter des parcelles de faible surface.

La possibilité d'atterrir sur des terrains de faible superficie facilite le ravitaillement en produit d'épandage. En quelques années, cette activité a connu en France un grand développement; à cet effet les exploitants utilisent des Bell 47 G, des SO. 1221 « Djinn » et des Alouettes « Astazou ».

7.4. Utilisations militaires. — L'hélicoptère doit son développement technologique actuel à l'intérêt que lui ont porté les forces armées, dès la fin de la seconde guerre mondiale.

Pendant les guerres d'Indochine et de Corée, des appareils, le plus souvent légers, ont été utilisés pour l'évacuation des blessés et le ravitaillement des postes isolés. Mais c'est avec l'engagement militaire des États-Unis d'Amérique au Vietnam que l'hélicoptère a commencé à être utilisé massivement et pour des missions multiples :

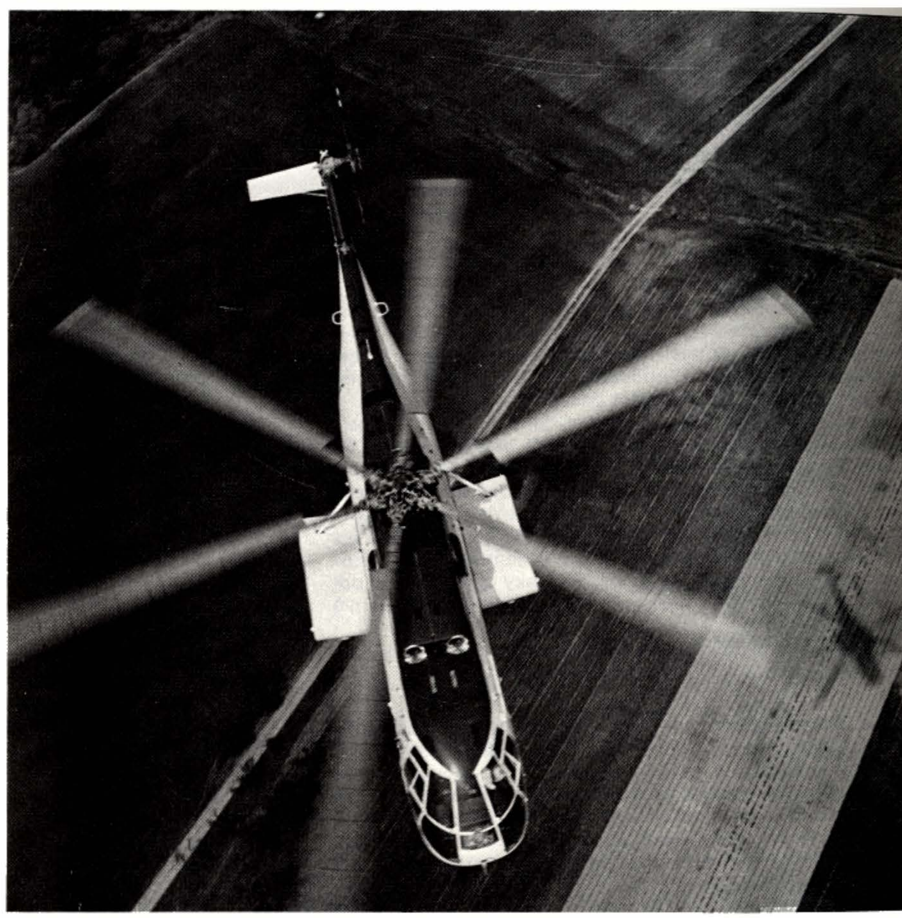
— Missions d'observation avec des appareils légers (Hughes 500, par exemple).

— Missions d'évacuation sanitaire, de transport de commandos avec des appareils moyens, comme le « Bell Iroquois ».

— Missions d'attaque au sol avec de véritables appareils de combat, biplaces puissamment motorisés et armés tels le « Huey Cobra ».



Aérospatiale Westland
S.A. 330 « Puma »



Aérospatiale S.A. 321
« Super Frelon »

Dans ces multiples utilisations, l'hélicoptère s'est révélé précieux mais aussi vulnérable à cause de sa fragilité mécanique et de sa faible vitesse.

Actuellement, dans les états-majors, les avis sont partagés sur l'avenir de l'hélicoptère de combat. Seules les missions de transport de commandos et d'évacuation des blessés semblent faire l'unanimité.

Pour les forces navales, l'hélicoptère fournit des moyens très efficaces de lutte contre les sous-marins, à telle enseigne que la plupart des marines ont construit à cet effet des bâtiments spéciaux ou « porte-hélicoptères ». Ces navires disposent de flottilles d'appareils embarqués, lourds le plus souvent. Chaque hélicoptère peut procéder à l'exploration du fond marin en immergeant, en vol stationnaire, une sonde à ultrasons qui lui permet de localiser les submersibles.

Il emporte de plus un armement important pour les neutraliser après détection. En France, un appareil de 13 t, le Super Frelon a été développé à cet effet et plusieurs exemplaires sont en service sur les porte-hélicoptères « Arromanche » et « Jeanne-d'Arc ».

Quoi qu'il en soit, les constructeurs ne doivent plus compter comme par le passé sur les commandes militaires pour assurer leur plan de charge. Les programmes militaires se raréfient et l'industrie de l'hélicoptère à l'image de celle de l'avion a déjà abordé sa mutation civile.

CHAPITRE VIII

PROPULSEURS

1. MOTEURS ENTRAÎNANT DES HÉLICES

1.1. Moteurs à pistons. — La plupart des avions de l'aviation générale utilise, encore actuellement, des moteurs à pistons, leurs prix d'achat étant moins élevés que ceux des turbomachines.

Ces moteurs sont construits sur le même principe que ceux des automobiles, étant, sans exception, refroidis à l'air. Comme leur masse joue un rôle prépondérant, on a cherché à réduire les épaisseurs de parois et les dimensions des pièces, en utilisant des matériaux plus résistants, (pour les pièces en acier laminé) ou plus légers pour les pièces coulées (alliages d'aluminium ou de magnésium).

Déjà avant la guerre 1939-1945, De Havilland en Grande-Bretagne et Renault en France construisaient des petits moteurs à 4 cylindres, d'une puissance de 135 à 150 ch (100 à 110 kW). Ces moteurs étaient du type « inversé », avec les cylindres en ligne, suspendus, tête en bas, sous leur carter. Cette solution plaçait l'axe de l'hélice en haut du capot-moteur, et permettait, tout en conservant la garde au sol nécessaire, d'abaisser le fuselage, rendant l'accès de la cabine plus facile aux passagers.

Après la guerre 1939-1945 est apparu, aux États-Unis d'Amérique, le moteur du type « plat » (*flat*) avec des cylindres horizontaux, opposés, de part et d'autre du carter. Ils sont maintenant couramment utilisés.

Cette disposition facilite la construction de l'arbre et de ses paliers en assurant un meilleur équilibre des efforts. Le moteur, très ramassé, a un maître-couple plus faible et son rapport de la poussée à la masse est meilleur. Le refroidissement des cylindres est également plus facile à réaliser. En revanche, dans le cas d'un monomoteur, la visibilité du pilote vers l'avant est moins bonne qu'avec l'ancienne formule du moteur à cylindres inversés.

Ils sont construits aux États-Unis d'Amérique principalement par deux firmes : Lycoming et Continental. La firme Rolls-Royce, en Grande-Bretagne, fabrique sous licence les moteurs de cette dernière.

Les moteurs de faible puissance, 100 à 200 ch (75 à 150 kW), sont des « *flat-four* » à 4 cylindres, deux de chaque côté. Les plus courants, d'une puissance de 150 à 400 ch (110 à 300 kW), sont des *flat-six* à 6 cylindres, avec trois par côté. On trouve aussi, mais plus rarement, quelques 8 cylindres.

Le courant d'air qui refroidit les cylindres, dotés d'ailettes, est admis par deux prises latérales ménagées à la surface du capot-moteur, sa sortie se faisant à l'arrière au travers d'ouïes placées, en général, sous le fuselage et pour les bimoteurs sous l'intrados des ailes.

Exemple : le moteur Continental TS 10-520 C à 6 cylindres (fig. VIII-1). De puissance maximale, 285 ch (210 kW), il pèse 213 kg ce qui donne un rapport de la puissance à

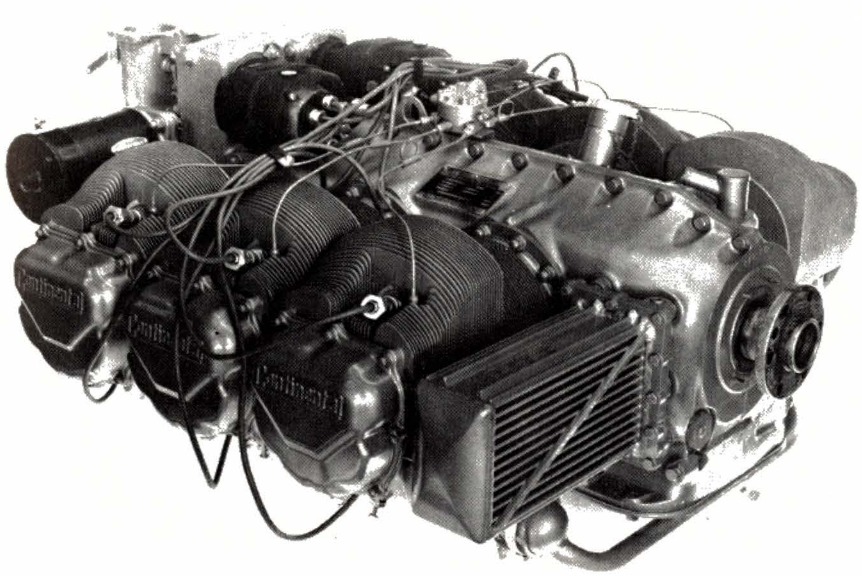


Fig. VIII-1

Moteur à pistons du type flat-six à 6 cylindres opposés Continental TS 10-520 (*Rolls-Royce Ltd*)

la masse égal à 1,34 ch/kg soit sensiblement 1 kW/kg. Longueur : 1,04 m ; largeur : 0,85 m. Sa consommation spécifique est de 430 g d'essence « aviation » par cheval et par heure de vol, ce qui correspond sensiblement à 120 litres consommés à 70 % de la puissance maximale par heure de vol en croisière.

En admettant une vitesse de croisière de 250 km/h, un quadriplace consomme 12 litres par passager et par 100 km de parcours, soit environ 4 à 5 fois plus qu'une voiture automobile.

Le diamètre du piston est de 132 mm ; sa course est égale à 100 mm. Autres caractéristiques : taux maximal de compression : 7,5/1 ; nombre de tours maximal : 2 700 tr/mn et 2 500 tr/mn en croisière.

1.2. Turbopropulseur. — Dans le domaine des puissances plus élevées, dépassant 500 ch (370 kW), l'apparition des moteurs rotatifs a bouleversé la technique des moteurs entraînant les hélices.

propulseur Turboméca « Astazou XIV » (France) (fig. VIII-3 et VIII-4), équipant les avions des lignes régionales Scotch-Aviation « Jetstream » (Grande-Bretagne) et le Pilatus « Turbo-Porter » (Suisse).

Dans le cas de l'« Astazou XIV », l'air pénètre à travers une entrée annulaire en *a*, et, dirigé vers l'intérieur *b*, alimente un premier compresseur axial à deux étages *c*, puis un compresseur centrifuge *d*. Ensuite, cet air comprimé parvient dans une chambre de combustion annulaire *e*. Les gaz brûlés attaquent une turbine à trois étages *f*. Les compresseurs et la turbine sont montés sur le même arbre *g*. Un démultiplicateur à double engrenage *h* entraîne l'arbre *k* qui supporte l'hélice *l*. L'ensemble des éléments mobiles est supporté par six paliers *m*. Les parties mobiles tournent à une vitesse d'environ 40 000 tr/mn. Ce moteur fournit une puissance maximale de 870 ch (640 kW) pour une masse totale de 160 kg, ce qui donne un rapport de la puissance à la masse voisin de 4 kW/kg, valeur incomparablement plus élevée que celle des moteurs à pistons.

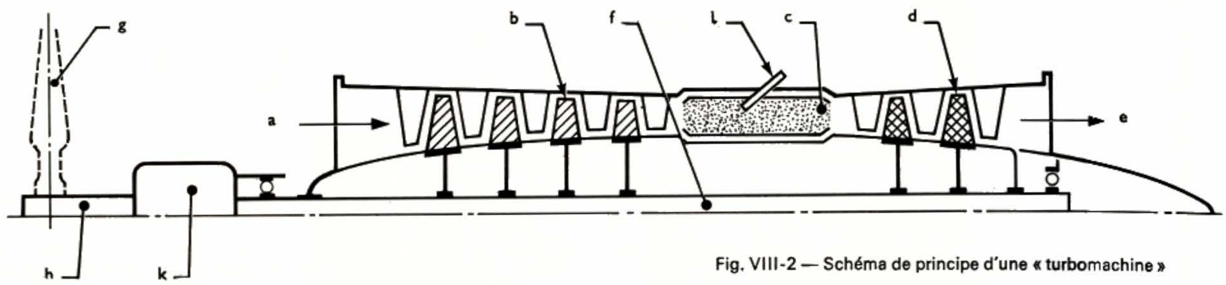


Fig. VIII-2 — Schéma de principe d'une « turbomachine »

Le principe d'une turbomachine est illustré par la figure VIII-2. L'air pénétrant à travers une entrée annulaire a traverse un compresseur rotatif, axial ou centrifuge, muni de plusieurs étages d'aubes *b* et, sous une pression élevée, pénètre dans une chambre de combustion *c*, dans laquelle on injecte le combustible. Les gaz brûlés, chauds au sortir de cette chambre, entraînent une turbine, à un ou plusieurs étages, garnie également d'aubes, *d*. Ces gaz sont évacués à l'arrière en *e*. La turbine et le compresseur sont montés sur un arbre commun *f*. C'est la turbine, actionnée par les gaz chauds, qui fournit la totalité de la puissance ; une partie de celle-ci est absorbée pour faire tourner le compresseur, le restant étant disponible, soit pour évacuer à grande vitesse les gaz chauds, créant ainsi une poussée dirigée vers l'avant (c'est le cas du « moteur à réaction », qui fait l'objet du paragraphe suivant), soit pour faire tourner une hélice *g*, montée sur un prolongement amont de l'arbre compresseur-turbine (l'on a alors un turbopropulseur). Les parties mobiles de la turbomachine, tournant à des vitesses très élevées, on est obligé d'intercaler, entre l'arbre *f* et celui de l'hélice *h*, un démultiplicateur *k*.

Pour la mise en route de ce moteur, on a recours à l'aide d'un démarreur électrique et à un allumeur *l* placé dans la chambre de combustion. Une fois amorcée, la combustion continue par auto-allumage, sans qu'il soit nécessaire de faire appel à des bougies, comme dans le cas des moteurs à pistons.

En partant de ce principe, il a été réalisé diverses combinaisons de compresseurs et de turbines, tel le turbo-

De plus, son diamètre de 0,55 m est faible, mais l'ensemble du moteur, capot d'hélice compris, est long (2,05 m), et oblige les constructeurs d'avions à prévoir un bâti-moteur allongé et renforcé.

La consommation spécifique est faible (240 grammes par cheval et par heure de fonctionnement). En outre le combustible est du kérosène, moins cher et d'une densité plus élevée que celle de l'essence (0,8 au lieu de 0,75), ce qui permet de diminuer les dimensions des réservoirs. Il existe, également, des turbopropulseurs à « turbine libre » : le compresseur et une première turbine constituent un « générateur de gaz », dont le jet, à la sortie de la turbine, attaque une deuxième turbine indépendante qui, seule, entraîne le propulseur. C'est le cas du Turboméca « Turmo III » qui propulse l'avion à décollage court « STOL » Bréguet 941. L'intérêt du principe de la « turbine libre » est, en cas de panne du moteur, de ne pas entraîner l'arrêt du propulseur.

2. MOTEURS À RÉACTION

2.1. Les réacteurs à simple flux. — L'accroissement de la vitesse des avions de ligne a rendu l'utilisation des moteurs à hélices pratiquement impossible ; en effet, pour éviter que les vitesses résultantes en bouts de pale ne deviennent supersoniques, il aurait fallu employer des hélices de diamètres relativement faibles, et calées à un très grand pas, donc à mauvais rendement, surtout au

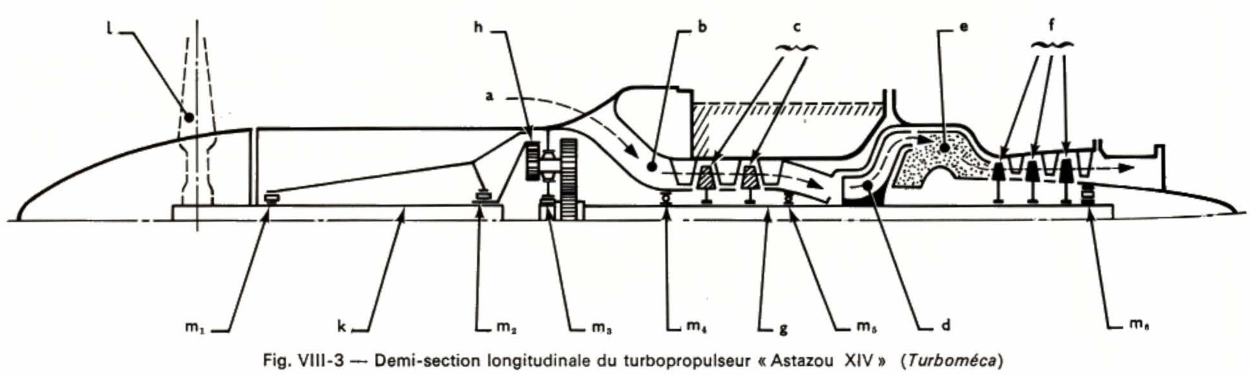


Fig. VIII-3 — Demi-section longitudinale du turbopropulseur « Astazou XIV » (*Turboméca*)

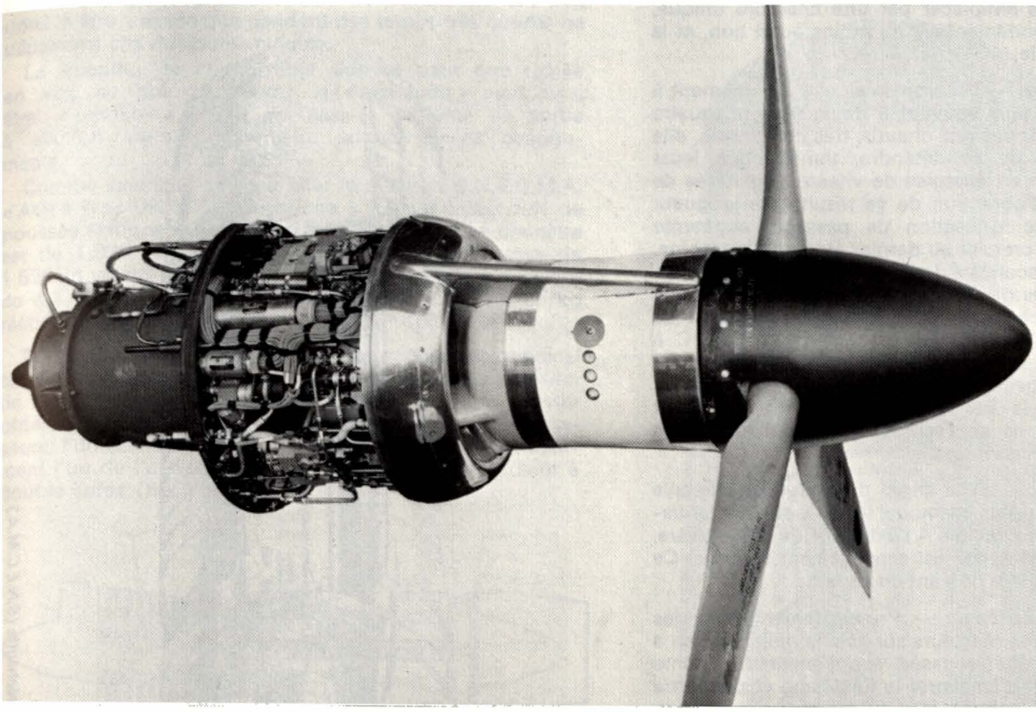


Fig. VIII-4

Turbopropulseur « Astazou XIV » (*Turboméca*)

décollage. On a donc retenu pour la propulsion de ces avions le principe du réacteur décrit précédemment.

Son développement a permis de construire des avions militaires (et exceptionnellement des avions civils), dépassant largement la vitesse du son.

2.1.1. Le compresseur. — C'est le type axial qui a été très généralement adopté en raison de son faible diamètre et de son rendement élevé. Pour obtenir à l'extrémité du compresseur une pression importante, il faut le construire « multi-étage ».

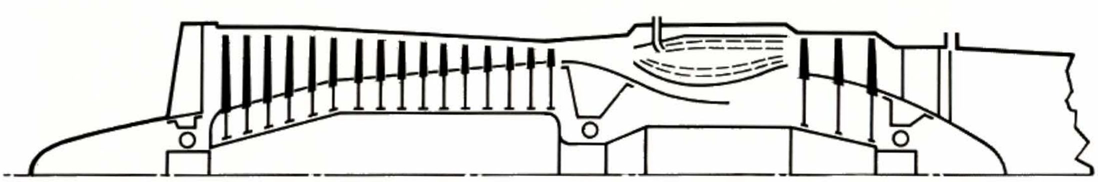
Exemple : le compresseur à 16 étages du réacteur Rolls-Royce « Avon » (fig. VIII-5) qui propulse la S.A. Caravelle.

L'augmentation de la pression se traduit par une diminution du volume ; en conséquence, la hauteur des dernières aubes est beaucoup plus faible que celle des aubes des premiers étages du compresseur. Cela compense l'accroissement des efforts qu'elles doivent supporter et facilite la construction.

2.1.2. La chambre de combustion. — Le rôle de la chambre de combustion est de mélanger l'air comprimé avec le combustible et, par combustion, de transformer son énergie chimique en énergie potentielle. Le combustible est injecté par des brûleurs qui pénètrent dans la partie amont de la chambre.

Au début de la construction des réacteurs il y avait plusieurs chambres de combustion (6 à 8) en forme de bonbonnes de section circulaire, placées tout autour de l'axe du moteur (V. fig. VIII-5 et VIII-6). La nouvelle

Fig. VIII-5



Demi-section à travers le réacteur Rolls-Royce « Avon » (les aubages des stators ne sont pas représentés)

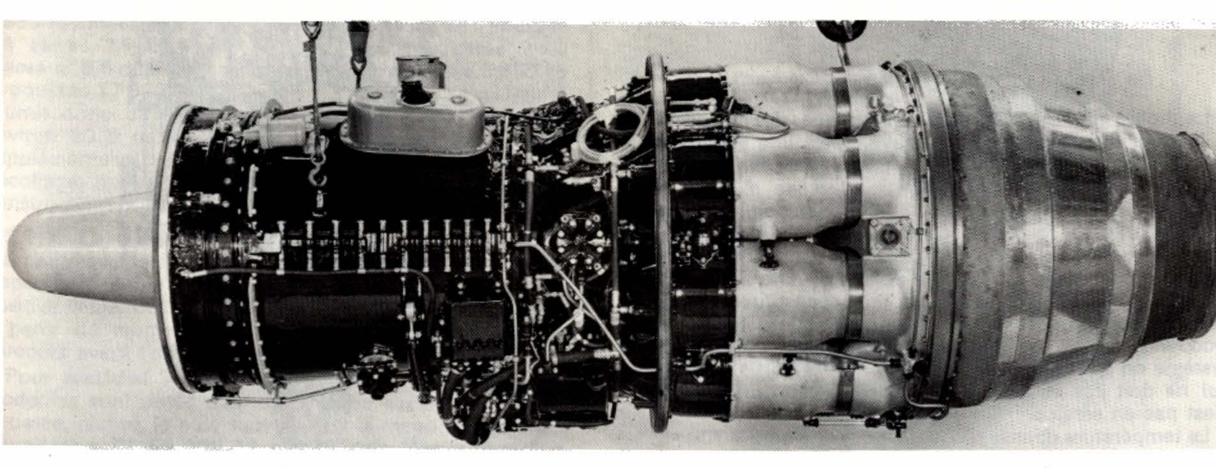


Fig. VIII-6 — Réacteur Rolls-Royce « Avon » civil à compresseur axial (*Rolls-Royce Ltd*)

tendance est de les remplacer par une chambre unique, annulaire, dont le rendement est au moins aussi bon, et la fabrication plus facile.

2.1.3. La turbine. — De type axial, elle est rarement à un seul étage mais plus souvent à deux, trois ou quatre étages. Alimentée par des gaz chauds, très comprimés, elle doit leur permettre de se détendre, transformant leurs énergies de pression en énergies de vitesse (quantités de mouvement). Pour l'obtention de ce résultat, la longueur des aubes, et donc la section de passage, augmente progressivement du premier au dernier étage de la turbine.

Les aubages sont soumis à des températures très élevées. Les températures des gaz, qui peuvent atteindre 2 000 °C à l'intérieur de la chambre, sont, grâce à un circuit de refroidissement par air, ramenées à environ 1 000 °C à l'entrée de la turbine. Néanmoins, il reste nécessaire de fabriquer ces aubages en acier réfractaire, et, dans les moteurs très poussés où la température d'entrée peut atteindre 1 200 °C, ils sont creux, afin de ménager un circuit d'air de refroidissement.

2.1.4. La tuyère. — À la sortie du moteur on installe une tuyère d'éjection plus ou moins longue, suivant la disposition du moteur sur l'avion. À l'extrémité de cette tuyère, la vitesse de sortie des gaz est sensiblement sonique. Ce type de réacteurs est très bruyant de ce fait.

2.1.5. La « réchauffe ». — Principalement dans les cas d'utilisation de ces réacteurs sur avions militaires, on a cherché à obtenir une poussée supplémentaire, même de courte durée, afin d'améliorer le décollage et permettre une forte accélération de l'avion, au moment du combat.

Cela a été acquis en remplaçant la tuyère ordinaire par une tuyère à « réchauffe » (ou « postcombustion »).

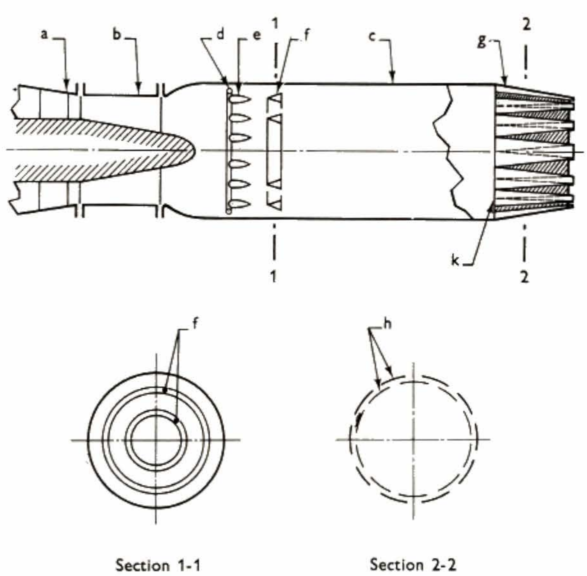


Fig. VIII-7 — Schéma d'un dispositif de réchauffe

La figure VIII-7 représente une tuyère de ce genre. À l'arrière du réacteur *a*, on trouve, après une allonge *b*, la chambre de postcombustion *c*. Le kérosène supplémentaire est introduit par l'anneau tubulaire *d*, doté de plusieurs brûleurs *e*. Pour que la combustion soit régulièrement répartie sur toute la section, les flammes rencontrent sur leur passage un ou deux anneaux concentriques à section en V (repère *f*). L'arrière de la réchauffe se termine par une sortie à géométrie variable *g*, constituée par un faisceau de plaques *h*, articulées à l'avant *k*, et qui se recouvrent plus ou moins. En modifiant la conicité du système on peut faire varier la section de la sortie des gaz, qui ne doit pas être la même, quand la réchauffe est ou n'est pas en service.

La température dans la réchauffe peut atteindre 1 700 °C. Elle peut donner 30 % à 40 % d'augmentation de poussée, mais au prix d'une consommation très élevée, pouvant



Fig. VIII-8 — Coupe du turboréacteur S.N.E.C.M.A. « ATAR 09 K 50 » avec réchauffe (*S.N.E.C.M.A.*)

atteindre cinq fois celle du réacteur sans réchauffe. Elle doit donc n'être utilisée que pendant des temps très courts, ne dépassant pas quelques minutes.

La quantité de combustible admise peut être réglée en vol, au gré du pilote; la « réchauffe » peut ainsi être « pilotable ». Dans ce cas, le système de sortie à section variable doit être adapté à ces changements.

Comme exemple, on peut citer le réacteur S.N.E.C.M.A. « Atar » type 09. K. 50 qui donne « à sec » 5 020 daN de poussée statique et 7 190 daN avec réchauffe. Le diamètre est de 1,020 m, la longueur de 5,940 m, la masse de 1 520 kg, ce qui donne un rapport de la poussée à la masse de 4,7 ch/kg, avec la réchauffe en service, et 3,3 ch/kg réchauffe éteinte (fig. VIII-8).

2.1.6. Le double corps. — Avec un compresseur axial classique, la valeur maximale du rapport entre la pression de sortie et celle d'entrée est environ 6. Pour pouvoir obtenir un rapport supérieur il a fallu monter deux compresseurs, l'un derrière l'autre, et les faire tourner indépendamment l'un de l'autre. Cela a été réalisé dans le réacteur à double corps (fig. VIII-9).

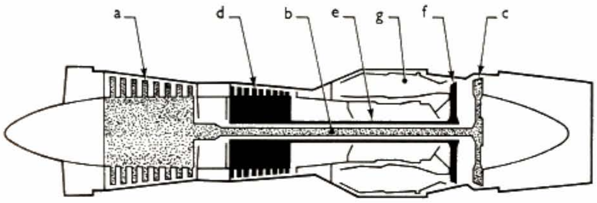


Fig. VIII-9 — Principe d'un réacteur à double corps

Chaque compresseur est lié à sa turbine par son arbre les deux arbres étant concentriques. Un corps basse pression (B.P.) est composé du premier compresseur *a*, de l'arbre interne *b* et de la turbine arrière *c*, tandis que le corps haute pression (H.P.) comprend le deuxième compresseur *d*, l'arbre tubulaire externe *e* et la turbine avant *f*. La chambre de combustion *g* se trouve entre les compresseurs et les turbines. Cette disposition permet une très bonne optimisation de vitesses et de pressions. Elle a permis de presque doubler le rapport de pressions, et d'améliorer nettement le rapport de la poussée à la masse.

Exemple: le réacteur simple flux à double corps avec réchauffe, Rolls-Royce-S.N.E.C.M.A. Olympus 593 Mk 602 (fig. VIII-10) qui équipe l'avion supersonique Concorde.

Le compresseur basse pression est à 7 étages, comme celui de haute pression. La turbine est à 2 étages. La chambre de combustion annulaire est dotée d'un système de prévaporisation du combustible, ce qui rend la combustion plus complète et supprime presque totalement la fumée dans les gaz d'échappement.

Caractéristiques. — Diamètre: 1,214 m; longueur: 6,930 m; masse en ordre de marche: 2 700 kg; poussée « à sec »: 14 800 daN (rapport de la poussée à la masse ≈ 5,5 daN/kg); avec « réchauffe »: masse 2 850 kg et poussée 17 800 daN (rapport 6,3 daN/kg). La réchauffe fournit donc un supplément (limité) de 3 000 daN, soit environ 20 % de la poussée « à sec », pour une masse supplémentaire de 150 kg; cela justifie son utilisation au décollage, malgré une augmentation du bruit perçu (les constructeurs s'efforcent de le réduire).

2.1.7. La « reverse ». — Un réacteur ne peut pas tourner très lentement, au risque de s'arrêter complètement. Cependant, même à l'extrême ralenti, il donne une poussée positive faible. Celle-ci devient très gênante à l'atterrissage, à partir du moment où l'avion touche la piste car son parcours avant l'arrêt se trouve allongé.

Pour remédier à cet inconvénient, tous les réacteurs modernes sont dotés d'un système de « *réversion* » de la poussée, réalisé, le plus souvent, par la manœuvre de deux paupières *a* (V. fig. VIII-11 a et b) articulées autour d'un axe horizontal *b*. En croisière, les paupières sont relevées

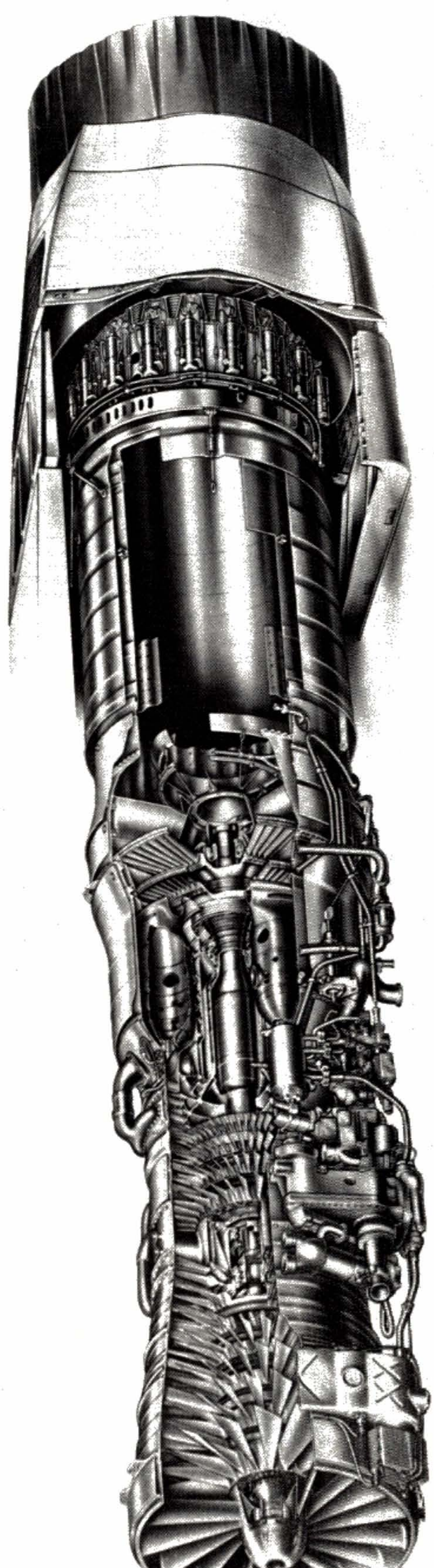


Fig. VIII-10 — Coupe du turboréacteur Rolls-Royce « Olympus 593 ». Première version avec chambres de combustion séparées et ancienne tuyère arrière S.N.E.C.M.A. (*Rolls-Royce Ltd - S.N.E.C.M.A.*)

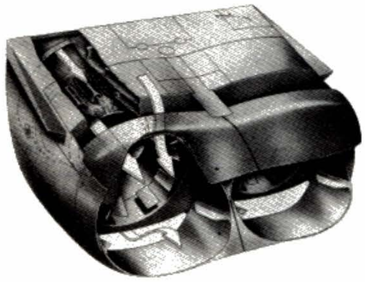


Fig. VIII-11 a

Tuyère TRA-28 pour deux moteurs côte à côte « Olympus 593 » du Concorde (*S.N.E.C.M.A.*)

En vol



En reverse au sol

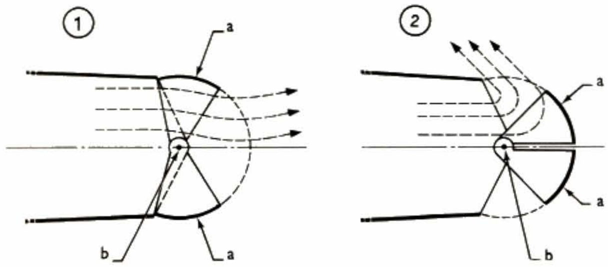


Fig. VIII-11 b — Principe du système de la « réversion » de la poussée (reverse aval)

pour dégager la sortie du jet (fig. VIII-11 b1), tandis que, pour le roulement après l'atterrissage, elles sont rabattues vers l'arrière (ainsi que la tuyère « TRA 28 » (*Thrust reversion aft*) dans le cas de l'Olympus ; V. fig. VIII-11 b2). En les ouvrant plus ou moins, on peut modifier la section de sortie et l'adapter pour un vol avec ou sans réchauffe.

2.2. Réacteurs à double flux à faible et moyenne dilution. — Pour obtenir une poussée accrue, sans une trop grande augmentation du maître-couple du moteur, on a ajouté au compresseur basse pression un ventilateur, dont le diamètre est légèrement plus grand que celui du moteur *a* (fig. VIII-12). Cette « soufflante », à aubes multiples à un ou à deux étages, communique à l'air capté une compression préalable et en envoie une partie dans le compresseur du réacteur *b* ce qui contribue à la compression de l'air pénétrant dans la chambre de combustion ; l'autre partie *c* passe sous une carène *d*, qui enveloppe le réacteur. Les deux flux, les gaz chauds *e* et l'air comprimé *f* se rejoignent et se mélangent à la sortie. Le rapport de la quantité d'air du flux *c* à celle absorbée par le moteur b donne le « taux de dilution ».

Outre une poussée accrue, ce type de moteur présente l'avantage d'être nettement moins bruyant, le bruit émis étant, en premier lieu, fonction de la vitesse d'éjection des gaz du moteur.

La figure VIII-12 représente une vue en coupe du réacteur double flux, double corps, Pratt & Whitney type JT 8 D-15 (propulseur du A.M. Dassault « Mercure »).

La soufflante *a* est à deux étages et le compresseur *g* basse pression (B.P.) à 4 étages. Cet ensemble, absorbant un peu plus de puissance, est entraîné par une turbine B.P. à 3 étages *h*, tandis que le compresseur H.P. à 7 étages comporte une simple turbine *l*.

La chambre de combustion annulaire *m* est pourvue de 9 injecteurs de kérosène. Deux allumeurs sont utilisés pour le démarrage et un troisième fonctionne en permanence pour parer à une éventuelle extinction de la flamme. Le premier étage du stator de la soufflante *n* est en titane ; il est protégé contre le givrage par une circulation d'air chaud.

Caractéristiques. Diamètre : 1,1 m ; longueur : 3,1 m. La soufflante donne un taux de compression de 1,9 ; le taux de compression totale est égal à 18 et le taux de dilution à 1,08. Poussée au point fixe 7 000 daN pour une masse de 1 500 kg, soit un rapport de la poussée à la masse de 4,7 daN/kg.

Pour d'autres moteurs, basés sur le même principe, la carène du deuxième flux est souvent plus courte que celle du moteur lui-même, les deux flux ayant des sorties différentes. Comme exemple on peut citer le moteur Rolls-Royce-S.N.E.C.M.A. M 45 H de 3 500 daN de poussée (fig. VIII-13 et VIII-14).

Caractéristiques. Diamètre (à l'extérieur de la carène) : 0,910 m ; longueur : 2,130 m ; soufflante à un étage ; compresseur BP à 5 étages ; compresseur HP à 7 étages ; turbine BP à 3 étages ; turbine HP à 1 étage ; chambre de combustion annulaire ; taux de compression : 18 ; taux de dilution : 2,8 (plus élevé que pour le moteur précédemment cité) ; masse en ordre de marche : 680 kg ; rapport de la poussée à la masse : 5,15 daN/kg. Grâce au taux de dilution plus élevé, la consommation spécifique au point fixe a été ramenée à 0,46 kg/daN . h de poussée et à 0,75 kg/daN . h pour la croisière à 6 000 m, avec une vitesse égale à 0,65 *M*.

2.3. Réacteurs à grande dilution. — Le développement des avions de ligne à grande capacité de charge exigeait la mise au point de moteurs beaucoup plus puissants. La dilution apportant un notable gain de consommation, et en même temps réduisant le bruit au décollage, on a entrepris, aux États-Unis d'Amérique et en Grande-Bretagne, d'étudier et de construire des moteurs d'environ 20 000 daN de poussée, avec taux de dilution importants, compris entre 5 et 6,5. Ces moteurs ont été dotés de soufflantes de grands diamètres, pouvant atteindre 2,50 m. L'air comprimé du deuxième flux donne, ainsi, à lui seul, les trois quarts de la poussée du moteur.

Les grands diamètres de ces moteurs ne sont pas très gênants, comparés aux dimensions des avions qu'ils doivent propulser.

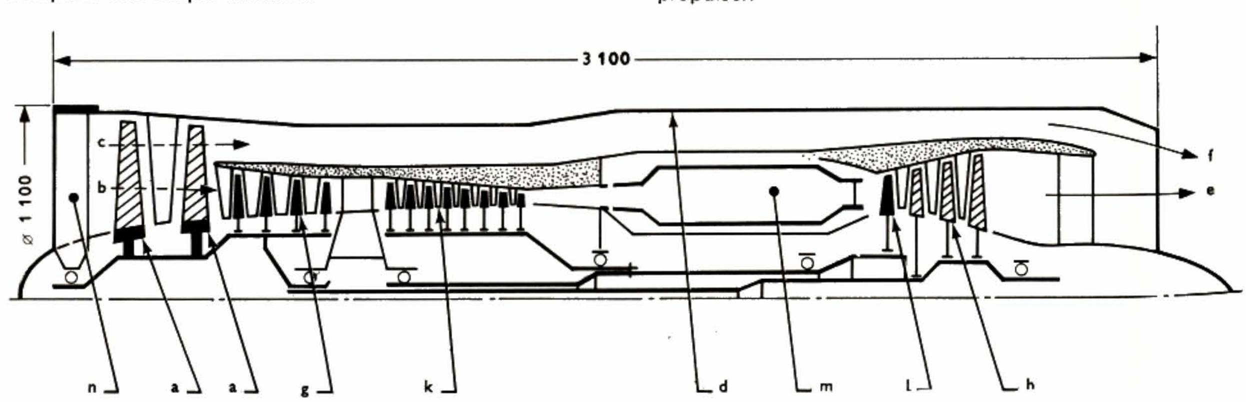


Fig. VIII-12 — Schéma d'un réacteur double flux, double corps Pratt & Whitney JT 8 D-15 (*Pratt & Whitney Aircraft*)

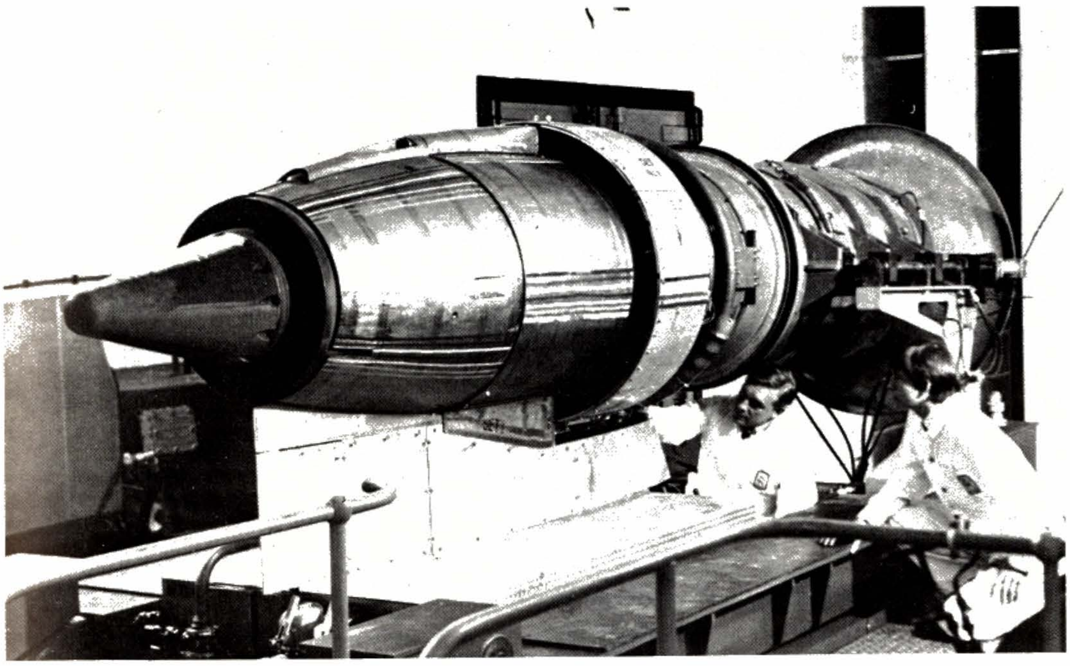


Fig. VIII-13

Réacteur double flux M 45 H au banc d'essais (*Rolls-Royce Ltd*)

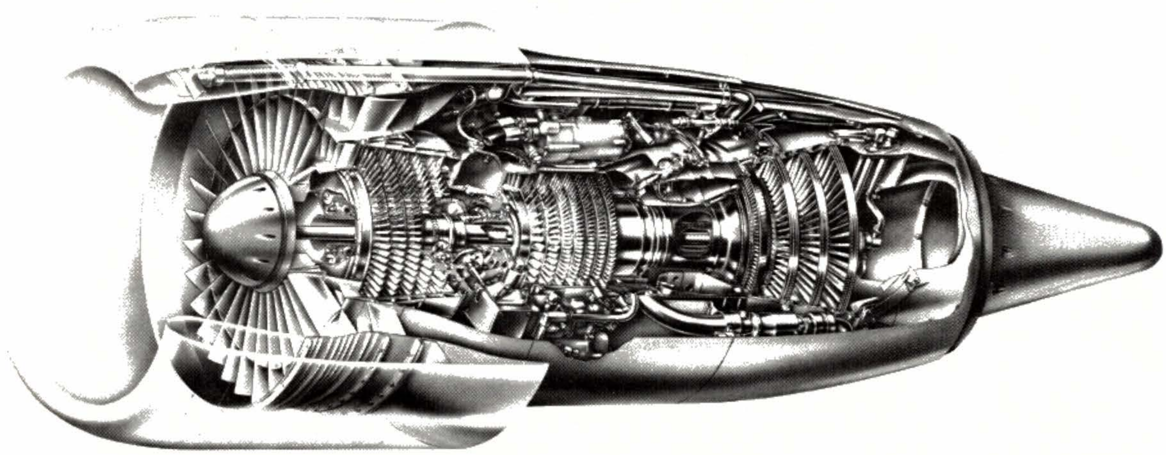


Fig. VIII-14 — Réacteur double flux, double corps avec soufflante M 45 H (*Rolls-Royce Ltd*)

Le tableau suivant indique les principales caractéristiques de trois moteurs de ce type.

Les deux premiers de ces moteurs sont à double corps. Le troisième (V. fig. VIII-15), propulseur du Lockheed « Tristar », est un triple corps, avec trois axes concentriques, dont le principe est représenté par la figure VIII-16. La soufflante *a* est entraînée par l'intermédiaire d'un arbre central *b* par sa propre turbine *c*. Les deux autres arbres, tubulaires, constituent les deux ensembles classiques : l'arbre *d*, le compresseur *e* et la turbine *f* pour le circuit basse pression ; l'arbre *g*, le deuxième compresseur *h* et la turbine *k* pour le circuit haute pression.

Cette indépendance de la soufflante permet, selon le constructeur, une meilleure adaptation automatique de son régime de rotation face aux changements de vitesse de vol de l'avion et rend ainsi possible un gain de consommation, ce qui est très appréciable pour un long-courrier.

Bien que le bruit émis par ce moteur soit très réduit on poursuit les recherches pour l'abaisser encore davantage (notamment en garnissant les parois internes des carènes avec des panneaux absorbants *l*).

En examinant le tableau ci-contre, on constate que le rapport de la poussée à la masse reste assez élevé (5,7 à 5,9 daN/kg) malgré la complication mécanique de ces moteurs.

Constructeur Type	Pratt & Whitney JT 9 D	General Electric CF 6-50	Rolls-Royce RB 211
Poussée maximale (décanewtons)	21 800	21 500	19 500
Masse (kilogrammes)	3 800	3 700	3 300
Rapport poussée/masse (daN/kg)	5,7	5,8	5,9
Taux de compression	24/1	26/1	25/1
Taux de dilution	5/1	6,3/1	5/1
Diamètre (mètres)	2,50	2,34	2,24
Longueur (mètres)	3,25	3,65	3,27
Nombre d'étages :			
Soufflante	1	1	1
Compresseur B.P.	6	3	7
Compresseur H.P.	11	15	6
Turbine H.P.	2	2	1
Turbine B.P.	4	4	1
Turbine de la soufflante	—	—	3

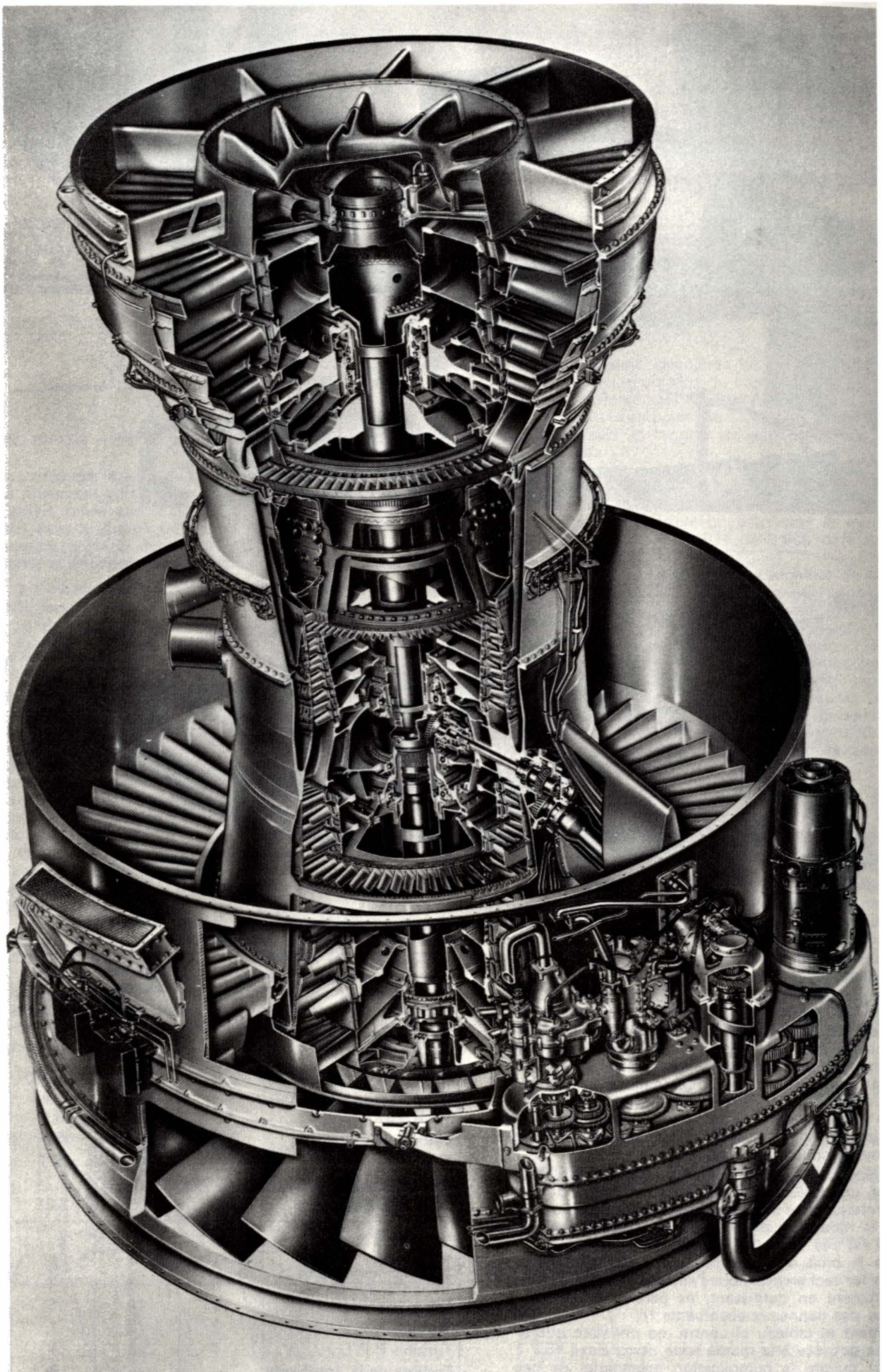


Fig. VIII-15 — Réacteur Rolls-Royce RB 211 à grande dilution (*Rolls-Royce Ltd*)

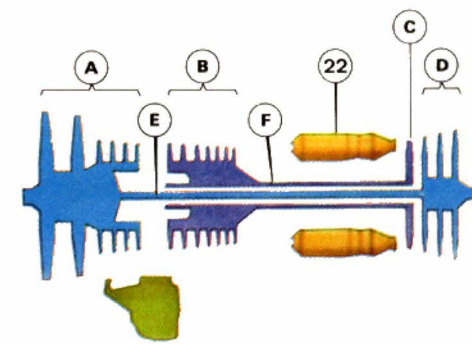
Turboréacteur J.T-80 à double flux
Pratt & Whitney aircraft

1. Cône d'entrée
2. Cône de sortie
3. Conduit de dégivrage
4. Tube de mise à l'air libre
5. Point de fixation avant
6. Brides de fixation arrière
7. Refroidisseur-échangeur de température
8. Démarreur
9. Remplissage du carter d'huile
10. Conduit de mise à l'air libre
11. Génératrice
12. Purgeur-distributeur
13. Bougie d'allumage
14. Boîte d'allumage
15. Câble de thermocouple
16. Conduit d'alimentation d'huile
17. Aubage directeur d'entrée
18. Enveloppe air secondaire
19. Brûleur
20. Chambre de combustion
21. Carter de sortie. Chambre de combustion
22. Tube à flamme.

A. Soufflante et compresseur basse pression (6 étages)
B. Compresseur haute pression (7 étages)
C. Turbine haute pression (1 étage)
D. Turbine basse pression (3 étages)
E. Arbre de turbine basse pression
F. Arbre de turbine haute pression

Turboréacteur à double flux



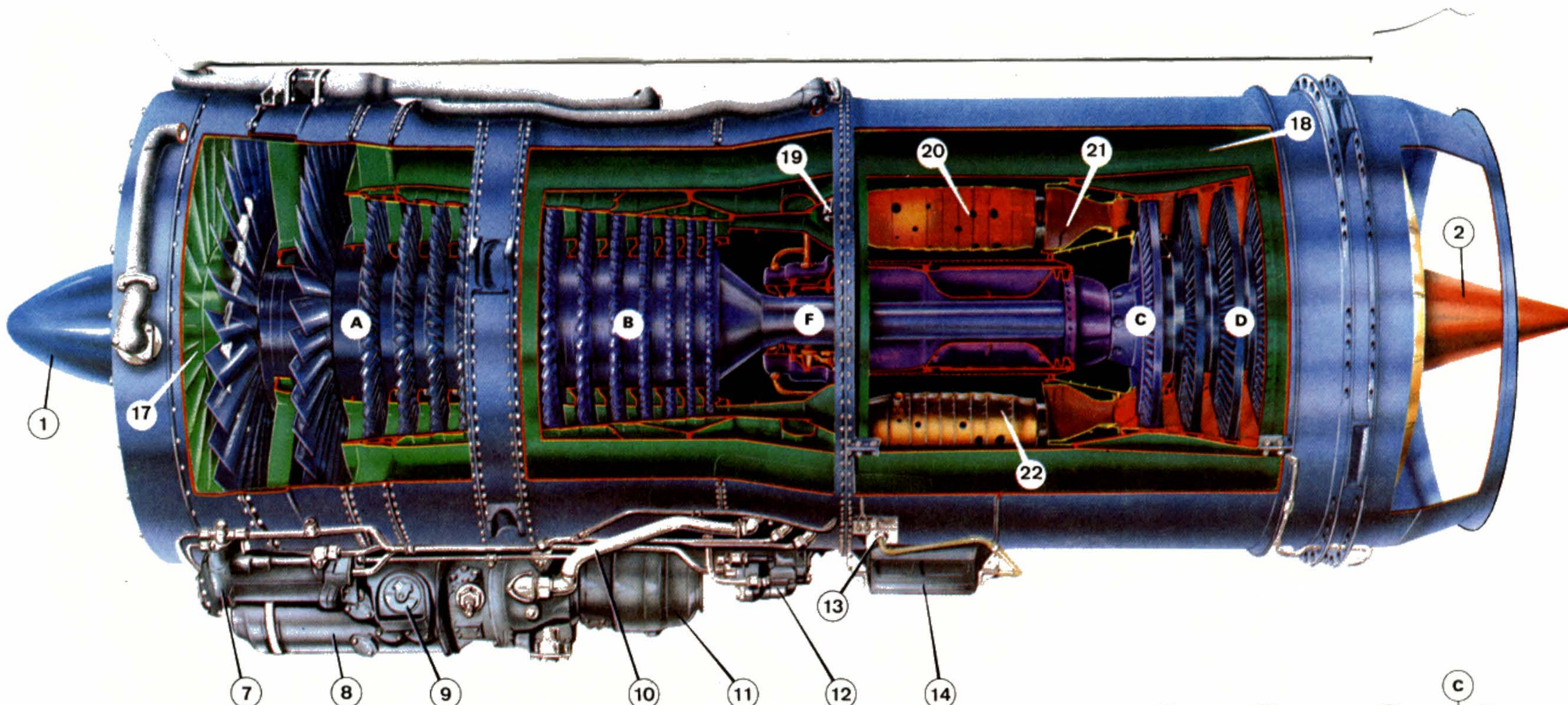


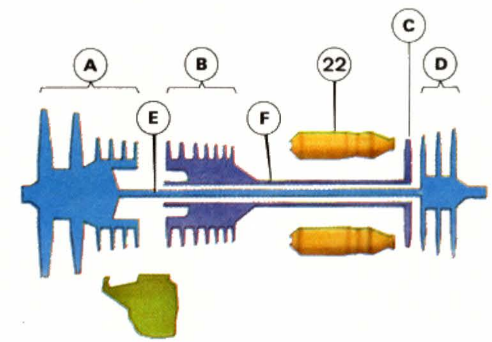
Vue schématique
des principaux
éléments

Turboréacteur J.T-80 à double flux
Pratt & Whitney aircraft

1. Cône d'entrée
2. Cône de sortie
3. Conduit de dégivrage
4. Tube de mise à l'air libre
5. Point de fixation avant
6. Brides de fixation arrière
7. Refroidisseur-échangeur de température
8. Démarreur
9. Remplissage du carter d'huile
10. Conduit de mise à l'air libre
11. Génératrice
12. Purgeur-distributeur
13. Bougie d'allumage
14. Boîte d'allumage
15. Câble de thermocouple
16. Conduit d'alimentation d'huile
17. Aubage directeur d'entrée
18. Enveloppe air secondaire
19. Brûleur
20. Chambre de combustion
21. Carter de sortie. Chambre de combustion
22. Tube à flamme.

A. Soufflante et compresseur basse pression (6 étages)
B. Compresseur haute pression (7 étages)
C. Turbine haute pression (1 étage)
D. Turbine basse pression (3 étages)
E. Arbre de turbine basse pression
F. Arbre de turbine haute pression





Vue schématique
des principaux
éléments

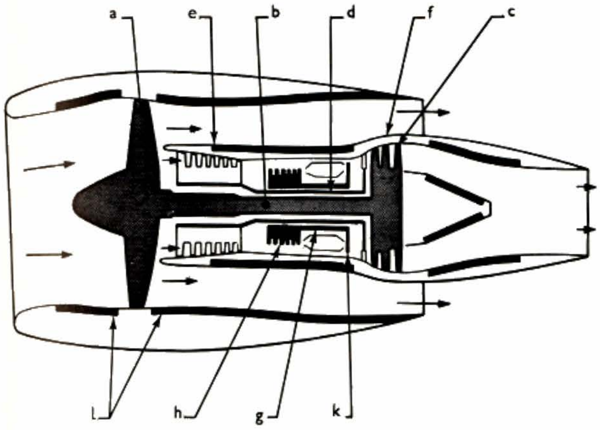


Fig. VIII-16

La consommation spécifique en croisière à 10 000 m d'altitude et à une vitesse de vol égale à 0,85 *M*, descend à environ 0,60 kg/daN . h de poussée, valeur très basse.

Le réacteur Pratt & Whitney JT 9 D, propulseur du Boeing 747 (fig. VIII-17) se caractérise par une soufflante de très grand diamètre (2,50 m). Sa fabrication en série est facilitée par une division en 10 « modules » indépendants (la soufflante, les compresseurs, la chambre de combustion, les turbines, etc.) entièrement terminés avant l'assemblage final.

Ainsi, la maintenance est également facilitée, car on peut échanger n'importe quel module, sans démonter entièrement le moteur.

Le moteur General Electric CF 6-50, propulseur de l'Airbus européen possède, entre le compresseur BP et celui du circuit H.P., une série de valves sur les parois du réacteur; commandées en vol elles permettent d'éliminer l'action du premier compresseur et de modifier la valeur du rapport de dilution.

La réverse installée à la sortie des gaz chauds de ces réacteurs n'était pas suffisante pour obtenir le freinage nécessaire lors de l'atterrissage, car elle n'agissait que sur une faible partie de la poussée. Il fallait inverser également la direction du jet de l'air du deuxième flux. Dans ce but, à l'arrière de la carène externe on a placé une grille dotée d'aubes creuses *a* (fig. VIII-18).

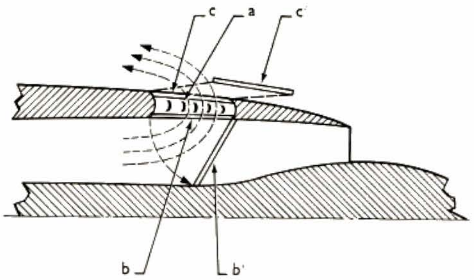


Fig. VIII-18

Principe d'une réverse sur carène d'un réacteur à grande dilution

Une série de portes internes *b* et externes *c* isole cette grille en vol. Lors de l'atterrissage, les portes internes sont rabattues vers l'arrière, jusqu'à obstruer le canal du deuxième flux (position *b'*), et les portes externes dégagent les grilles en s'effaçant, par exemple, vers l'arrière, grâce à un mécanisme en parallélogramme (position *c'*).

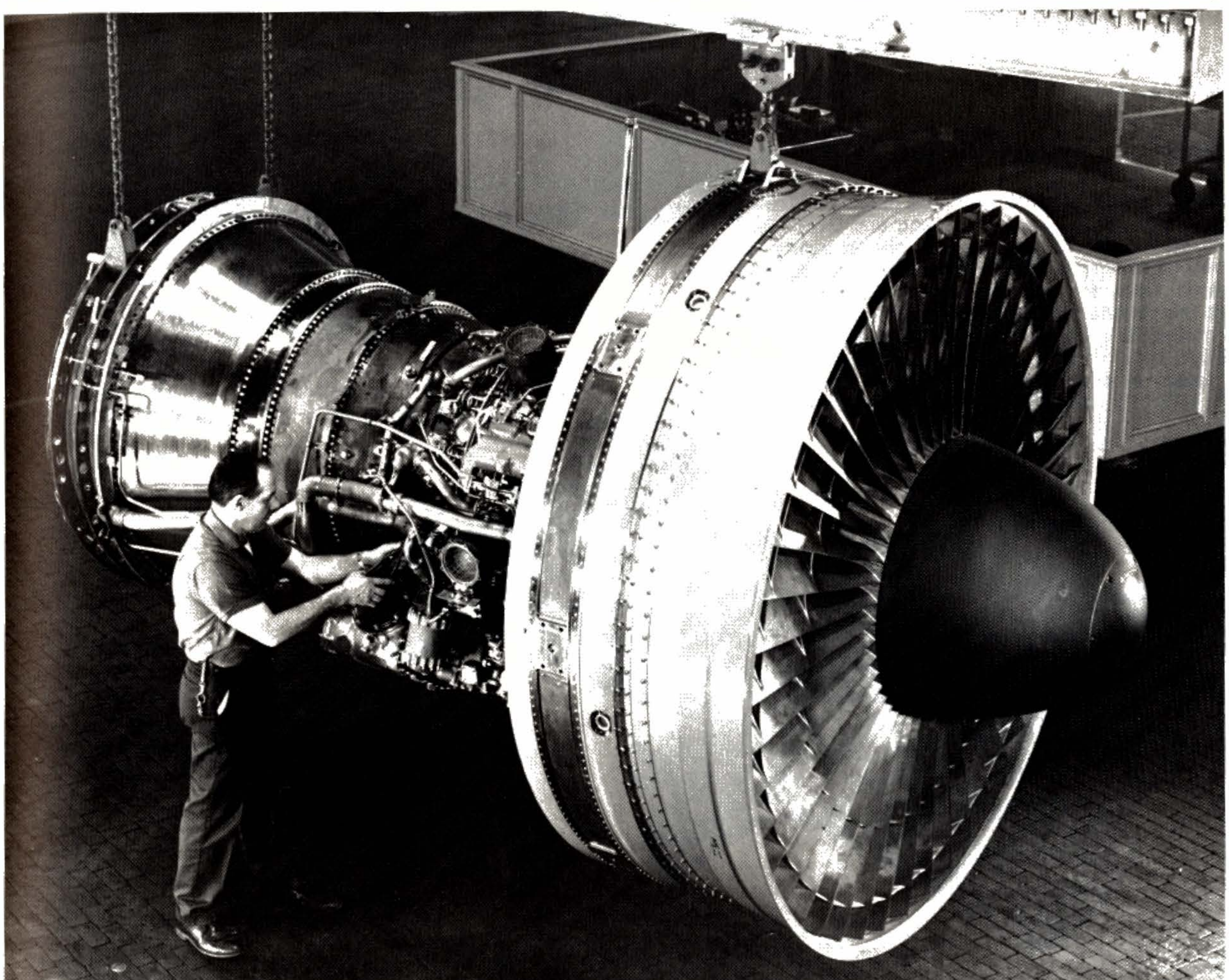


Fig. VIII-17 — Réacteur Pratt & Whitney JT 9 D à grande dilution (*Pratt & Whitney Aircraft*)

Cette double manœuvre oblige l'air à traverser la grille et crée ainsi un important effort de freinage, qui s'ajoute à celui de la reverse des jets des gaz chauds.

2.4. Réacteurs à jet vectoriel. — Pour permettre le décollage vertical des avions et leur assurer ensuite une propulsion classique, la société Rolls-Royce (division Bristol) a conçu un moteur : le « Pegasus », doté de quatre tuyères orientables. Elles peuvent diriger le jet dans un secteur compris entre 10° vers le bas en avant de la verticale, et jusqu'à l'horizontale vers l'arrière (fig. VIII-19 a et b). Ces tuyères tournent autour d'axes horizontaux, sur des billes disposées le long de leurs jonctions périphériques circulaires. Leurs mouvements sont rigoureusement synchronisés. Cette rotation, commandée en vol par le pilote, peut se faire très rapidement, en moins d'une seconde ; on peut, en outre, les immobiliser dans des positions intermédiaires.

Le moteur étant à double flux, les deux tuyères avant projettent de l'air comprimé, provenant partiellement du compresseur basse pression, l'autre partie de l'air étant dirigée vers le compresseur haute pression.

Les deux tuyères arrière projettent des gaz chauds. La dilution (ici le rapport entre la quantité de l'air des tuyères avant et celle des gaz des tuyères arrière) est de 1,4/1. Cela donne des poussées avant et arrière à peu près égales pour les différents régimes du moteur ; cela évite la création d'un moment secondaire de tangage, qui pourrait être gênant pour un petit intercepteur, comme le Hawker « Harrier », spécialement dessiné autour de ce moteur.

Ce réacteur est à double corps ; le compresseur B.P. à deux étages est entraîné par une turbine B.P. à deux étages et le compresseur H.P. (à 7 étages) est lié à une turbine H.P. également à deux étages. Les aubes des turbines sont refroidies par une circulation d'air. La chambre de combustion est annulaire dans les dernières versions. Les deux corps tournent dans des sens inverses pour annuler le couple gyroscopique qui tendrait à s'opposer aux manœuvres de l'avion.

Le taux de compression total dépasse 12/1. La dernière version « Pegasus 11 » donne une poussée maximale de 9 800 daN pour une masse de 1 650 kg, avec un rapport de la poussée à la masse assez élevé, égal à 5,9 daN/kg, bien que les jets d'air, et ceux des gaz, subissent un double changement de direction. Le développement de la poussée par l'accroissement du taux de compression et de la vitesse d'éjection, aussi bien de l'air que des gaz chauds, devrait améliorer simultanément les rendements des deux groupes de tuyères.

Ce moteur étant destiné à sustenter des avions se déplaçant très lentement, ou restant immobiles dans l'air, on prélève de l'air comprimé derrière les compresseurs pour le conduire, à travers des tuyauteries, vers les extrémités des ailes et du fuselage, où des buses commandées le projette vers le bas. Cela permet de suppléer à une défaillance des gouvernes aérodynamiques aux faibles vitesses

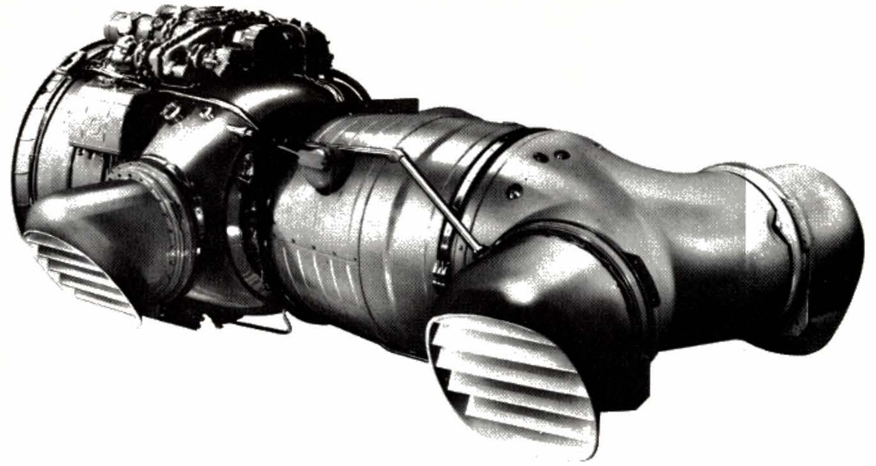


Fig. VIII-19 a

Réacteur à jet vectoriel « Pegasus » pour avions VTOL (*Rolls-Royce Ltd*)

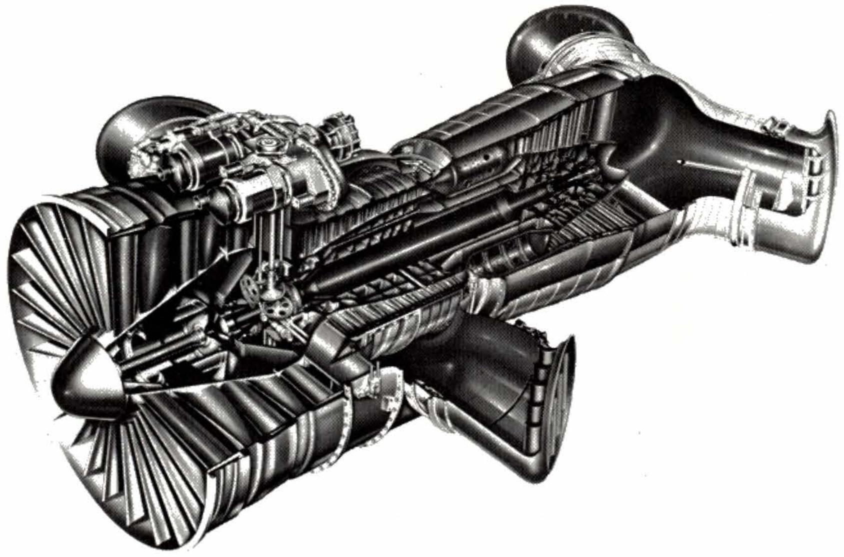


Fig. VIII-19 b

Écorché d'un réacteur à jet vectoriel « Pegasus » pour avions VTOL et STOL (*Rolls-Royce Ltd*)

de l'avion. Le moteur étant spécialement conçu pour cette opération, on peut prélever normalement 3 kg d'air par seconde, avec un maximum de 8 kg/s, mais pour une durée très courte. Le système de contrôle de ce débit, lié au débattement des commandes de vol, est mis hors service lors du vol « classique ». Le diamètre du moteur est de 1,22 m et sa longueur de 2,50 m.

2.5. Réacteurs légers pour avions à décollage vertical. — Le petit réacteur RB 162, construit également par Rolls-Royce, est destiné à être monté verticalement avec son jet dirigé vers le sol.

Montés en deux groupes de 4 unités sous les ailes de l'avion Dornier 31, ou séparément, dans le fuselage du chasseur allemand expérimental VF W-YAK.191 B, ils accompagnent, dans les deux cas, les moteurs à jets dirigés « Pegasus » décrits précédemment.

taux de compression est de 4,25. Il a été prévu un prélèvement important de l'air comprimé, pouvant atteindre 10 % du débit du compresseur. Ce prélèvement se fait dans une poche annulaire, extérieure à la chambre de combustion, alimentée par une partie de l'air dévié par le dernier étage du compresseur.

Caractéristiques. — Diamètre : 0,74 m ; longueur avec la tuyère : 1,50 m. Poussée du dernier modèle RB 162/81 : 2 700 daN ; masse : 170 kg, ce qui donne un rapport de la poussée à la masse extrêmement élevé de 16 daN/kg. Sa consommation spécifique, plein gaz et vitesse de déplacement nulle, est de 1,2 kg par heure et par décanewton de poussée.

La température des gaz à la sortie de la tuyère est de 750 °C et leur vitesse atteint 600 m/s, ce qui fait que ce moteur est très bruyant. En outre, il faut prendre des précautions spéciales pour protéger la piste d'envol contre

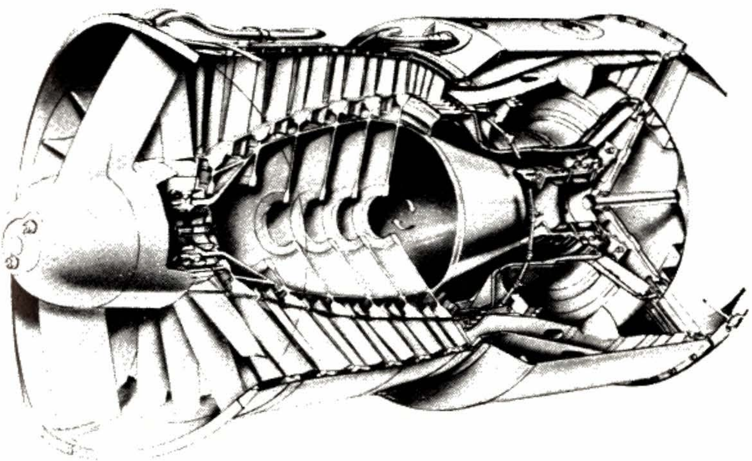


Fig. VIII-20

Réacteur léger RB 162
(*Rolls-Royce Ltd*)

Étant destiné à n'être utilisé que lors du décollage et de l'atterrissage, donc pendant un temps très court par rapport à la durée du vol, ce moteur a été conçu pour une « durée de vie » limitée, ce qui a permis une construction très légère. Sa simplicité a été poussée à l'extrême. Le moteur est à simple flux et corps unique, avec un compresseur à 6 étages, les aubes étant montées directement sur un cylindre en matière plastique stratifiée (fig. VIII-20). Cet ensemble est supporté seulement par deux paliers placés aux extrémités.

Derrière une chambre annulaire se trouve une turbine à un étage, avec aubes refroidies par l'air. Le moteur est pourvu d'une courte tuyère à section de sortie réduite. Le

une détérioration et éviter le retour des gaz vers les éléments de l'avion, et un « recyclage » des gaz brûlés par aspiration par la prise d'air du moteur.

Une nouvelle version du même moteur, mais « dératée », c'est-à-dire, avec une poussée limitée à 2380 daN et une structure renforcée afin d'augmenter sa « durée de vie », est maintenant utilisée comme moteur d'appoint au décollage de l'avion civil de transport de passagers Hawker « Trident 3 B ». Ce moteur est monté horizontalement dans la pointe arrière du fuselage sous la tuyère d'éjection du moteur central de propulsion. Cette version pèse 240 kg, ce qui donne un rapport de la poussée à la masse de 10 daN/kg, valeur encore très intéressante.

CHAPITRE IX

LANCEURS ET FUSÉES-SONDES

1. LES LANCEURS

On désigne sous le nom de lanceur un engin propulsé par fusée dont la mission consiste à faire suivre à une charge utile déterminée une trajectoire balistique en dehors de l'atmosphère terrestre. Selon les valeurs de l'énergie propulsive et de la charge utile, on peut définir divers types de trajectoires :

— celles qui recoupent la surface terrestre après passage par l'apogée ; c'est le cas des trajectoires des *missiles balistiques* dont le rayon d'action peut être compris entre quelques centaines et quelques milliers de kilomètres ;

— celles qui ne recoupent plus la surface terrestre et qui aboutissent à une mise en orbite autour de la Terre. Elles correspondent aux trajectoires des *lanceurs de satellites ;*

— celles qui s'écartent de la Terre à un point tel que les lanceurs sont soumis à l'attraction gravifique d'autres astres (Lune, planètes, voire le Soleil) ; c'est le cas des trajectoires des *lanceurs spatiaux.*

Ces trois types de trajectoires se différencient par la vitesse en fin de propulsion qui doit être de plus en plus grande lorsque l'on passe des missiles balistiques aux lanceurs de satellites, puis aux lanceurs spatiaux. Les valeurs de cette vitesse sont inférieures à 7 000 m/s dans le premier cas, comprises entre 7 000 et 11 000 m/s dans le second, et supérieures à 11 000 m/s dans le troisième. Mais il ne suffit pas de communiquer une certaine vitesse finale à la charge utile ; il faut encore que cette vitesse soit orientée convenablement et qu'elle soit atteinte en un point déterminé de la trajectoire. On fait ainsi apparaître deux autres fonctions fondamentales du lanceur : le pilotage et le guidage.

1.1. La propulsion. — Elle fait uniquement appel aux moteurs-fusées mais les caractéristiques sont différentes suivant d'abord le type de lanceur et suivant le niveau de l'étage intéressé. L'obtention des performances requises est en effet impossible avec un seul étage propulsif, et les lanceurs sont toujours constitués de deux ou trois étages, voire parfois de quatre.

Si l'on désigne par V_s la vitesse d'éjection des gaz du moteur-fusée, par m_p la masse des propergols, par m_s la masse de la structure, et par m_u la charge utile, les lois de la mécanique donnent pour l'augmentation de vitesse de l'engin liée à la consommation de la masse m_p de propergols, la valeur :

$$\Delta V = V_s . \ln \left[\frac{(m_p + m_u + m_s)}{(m_u + m_s)} \right]$$

On voit que même pour une charge utile nulle, l'augmentation de vitesse est limitée à $V_s . \ln \frac{(m_p + m_s)}{m_s}$. Or, les meilleures valeurs du rapport $\frac{m_s}{(m_p + m_s)}$, appelé *indice constructif de l'étage*, compatibles avec une résistance mécanique suffisante de la structure sont comprises entre 0,1 et 0,05. L'accroissement de vitesse maximal donné par un étage unique est donc de l'ordre de 2 V_s (rappelons que $\ln \frac{1}{0,1} = \ln 10 = 2,3$) soit, avec les combustibles actuels, de 9 km/s ; encore cette valeur diminue-t-elle très vite dès que la charge utile augmente. Aussi, même pour les missiles balistiques, ne peut-on se contenter d'un seul étage. Dans une fusée à plusieurs étages, la structure des étages qui ont accompli leur tâche est larguée, ce qui améliore d'autant l'indice constructif de la partie restante du lanceur. L'accroissement de vitesse global d'une fusée à étages multiples s'obtient en additionnant les accroissements de vitesse procurés par chacun des étages.

La propulsion des lanceurs fait essentiellement appel à deux types de moteurs-fusées : les fusées à propergols liquides et les fusées à propergols solides, encore appelés propulseurs à poudre.

1.1.1. Les fusées à propergols liquides. — Dans ce type de moteurs, les ergols, un comburant, d'une part, et un combustible, de l'autre, sont introduits sous pression dans une chambre de combustion où ils donnent lieu à une réaction chimique fortement exothermique. Les gaz résultant de cette réaction, portés à une température élevée, sont détendus à travers une tuyère où leur énergie thermique est transformée en énergie cinétique, c'est-à-dire en vitesse. Les combinaisons d'ergols les meilleures sont celles qui sont les plus énergétiques c'est-à-dire celles qui conduisent à la vitesse d'éjection la plus élevée. En réalité, on caractérise plutôt une combinaison propergolique par son *impulsion spécifique* qui est le rapport $\frac{T}{c_s}$ de la poussée à la consommation spécifique d'une fusée utilisant le mélange considéré. Elle s'exprime en secondes.

Les comburants les plus utilisés actuellement sont l'oxygène liquide, l'acide nitrique et le péroxyde d'azote (N_2O_4). Quant aux carburants, ils comprennent l'hydrogène liquide, le kérosène, et l'UDMH (diméthylhydrazine dissymétrique) ; ont peut aussi citer l'essence de térébenthine, dont l'emploi est pratiquement abandonné, mais qui avait été adoptée pour le premier étage du lanceur Diamant.

Les principales combinaisons de propergols liquides sont classées dans le tableau ci-après par ordre d'impulsions spécifiques croissantes.

Propergols liquides	Impulsion spécifique
N_2O_4 — UDMH	285 s
Oxygène liquide - kérosène	300 s
O_2 liquide — H_2 liquide	410 s

Sur le plan de l'utilisation, on doit mettre à part les combinaisons qui font appel à l'oxygène liquide ou à l'hydrogène liquide. Ces ergols, appelés cryogéniques parce qu'ils doivent être conservés à une très basse température, nécessitent un calorifugeage soigné des réservoirs. De plus, le remplissage des réservoirs doit être effectué peu de temps avant le lancement, ce qui constitue une limitation d'exploitation. C'est pourquoi, bien que la réaction N_2O_4— UDMH ait des performances quelque peu inférieures, elle est souvent préférée car elle permet de conserver les lanceurs remplis, même s'il y a un report du lancement qui n'excède pas quelques jours. Ces propergols sont dits *stockables*.

De plus, il faut aussi mettre au passif de l'hydrogène liquide sa très faible masse volumique qui conduit à des réservoirs très volumineux. Aussi, n'est-il utilisé que pour les étages supérieurs des lanceurs pour lesquels les masses d'ergols ne sont pas trop importantes.

La technologie des moteurs-fusées à liquides pose deux problèmes principaux : l'alimentation de la chambre de combustion et la tenue de la chambre et de la tuyère aux températures de combustion.

La structure d'un étage à propulsion à liquides se compose essentiellement de réservoirs et d'un éjecteur, auxquels il convient d'ajouter quelques organes électriques, hydrauliques et pneumatiques, dont le nombre est variable, qui ont pour objet d'assurer la mise en œuvre du propulseur depuis les opérations de remplissage des ergols jusqu'à l'arrêt de la propulsion.

Les réservoirs sont des cylindres fermés par des fonds de forme généralement ellipsoïdale. Dans la plupart des cas, les deux réservoirs de comburant et de combustible sont superposés ; dans certains cas, cependant, les deux ergols sont logés dans le même réservoir divisé en deux parties par un fond intermédiaire (c'est le cas du premier étage du lanceur Diamant B). On cherche évidemment à rendre les réservoirs le plus légers possible, ce qui conduit à utiliser des matériaux à hautes caractéristiques mécaniques présentant en outre une bonne résistance à l'action chimique des ergols et une soudabilité aisée. Tel est le cas des aciers faiblement alliés, comme le vascojet 1000 (acier au chrome-vanadium) et le maraging (acier au nickel-cobalt-molybdène). Les éléments cylindriques peuvent être réalisés suivant la technique du roulé-soudé à partir de tôles d'une épaisseur variable avec le diamètre du cylindre, mais ne dépassant pas quelques millimètres ; c'est le procédé le plus répandu. Un deuxième procédé fait appel au *fluotournage* à partir d'ébauches forgées ; son prix de revient est plus élevé mais il présente l'avantage d'éliminer les soudures longitudinales qui constituent une zone de faiblesse. Les différents étages sont reliés entre eux par des viroles métalliques, appelées jupes, de formes cylindriques ou tronconiques. Elles doivent présenter de bonnes qualités de rigidité et sont souvent réalisées en matériaux sandwich métalliques, notamment en nids d'abeilles. Le plus grand diamètre de réservoir fabriqué actuellement est celui du premier étage du lanceur Saturne V qui atteint 10,03 mètres.

Un problème important, lié à la structure des réservoirs, est celui de l'alimentation en ergols de la chambre de combustion. Celle-ci implique que les ergols soient injectés dans la chambre sous une pression supérieure à la pression de combustion. Deux solutions sont alors en présence : soit pressuriser les réservoirs, ce qui nécessite qu'ils soient conçus pour résister à une pression qui peut être supérieure à 30 bars, soit pomper les ergols directement à la partie inférieure des réservoirs à l'aide de turbopompes, les réservoirs n'étant alors soumis qu'à une pression relativement faible. Dans la première solution, la pressurisation est généralement assurée par des gaz neutres, en particulier de l'hélium, fortement comprimés dans des réservoirs sphériques ; cette technique présente l'avantage d'être simple, mais, en revanche, elle est assez lourde. Elle est limitée à des étages de poussée relativement modérée. On peut également pressuriser les réservoirs en fabriquant les gaz de mise sous pression (par une réaction de combustion, à bord de l'étage) ; on obtient un gain de masse par rapport à la solution précédente car les substances génératrices de gaz sont liquides et ne nécessitent que des réservoirs légers. Cette solution a notamment été adoptée sur le premier étage de Diamant A et de Diamant B, et sur le second étage du lanceur Europa (fig. IX-1). Il faut noter que les gaz ainsi produits sont portés à une température assez élevée et qu'ils ne doivent évidemment pas réagir avec les ergols.

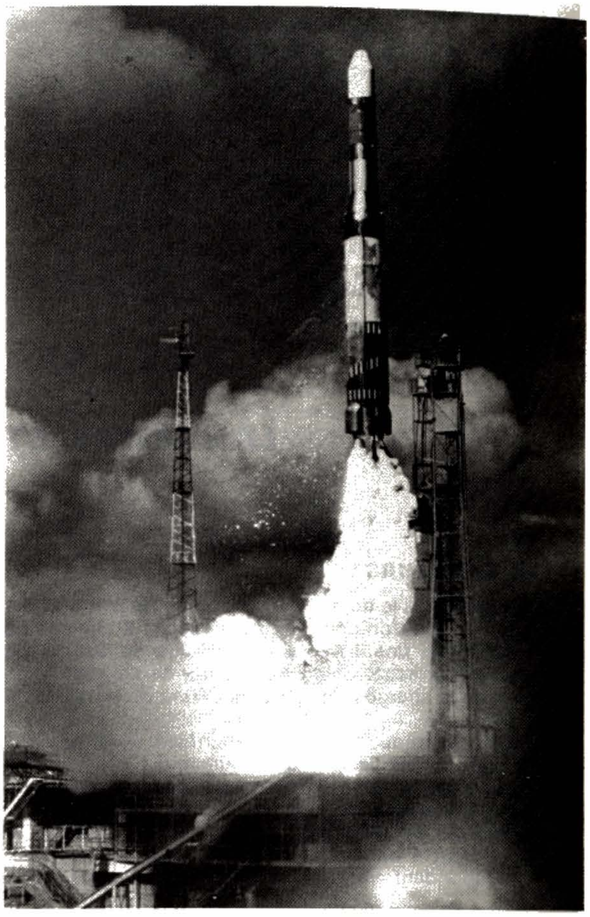


Fig. IX-1 — Lancement d'Europa I à Woomera (*Cecles-Eldo*)

L'emploi de turbopompes conduit à des structures beaucoup plus légères, puisque les réservoirs n'ont plus besoin de devoir résister à des pressions internes élevées, mais la technologie est plus délicate. Cette technique ne se justifie que pour des engins présentant un temps de fonctionnement et un débit d'ergols élevés ; c'est le cas pour les premiers étages des lanceurs Europa et Saturn V. La pompe est entraînée par une turbine, elle-même alimentée en gaz chauds par un générateur utilisant les mêmes ergols que le moteur-fusée ; généralement, il y a une turbopompe différente pour le carburant et le comburant.

L'éjecteur constitue l'organe de propulsion proprement dit. Il se compose d'un injecteur, d'une chambre de combustion et d'une tuyère. L'injecteur a pour objet de pulvériser les ergols et de les mélanger afin de faciliter la combustion. La chambre de combustion doit présenter un volume suffisant pour que les ergols aient le temps de s'y vaporiser et de brûler complètement. Pour des raisons de fabrication, elle est généralement de forme cylindrique. La tuyère a pour rôle de détendre les gaz de combustion en transformant l'énergie thermique en énergie cinétique, en passant par la phase intermédiaire d'énergie de pression ; elle se présente sous une forme convergente-divergente, avec un col où la section passe par un minimum. La partie convergente est généralement assez courte ; la partie divergente est constituée par un tronc de cône d'angle au sommet compris entre 15 et 20 degrés, d'autant plus long que la pression à la sortie de la tuyère est plus basse, ce qui correspond à un rapport de détente plus élevé.

Avec les propergols actuellement utilisés, les températures de combustion dépassent 3 000 °C et les flux thermiques transmis par les gaz de combustion aux parois de la chambre et de la tuyère sont très élevés. Il faut donc, soit

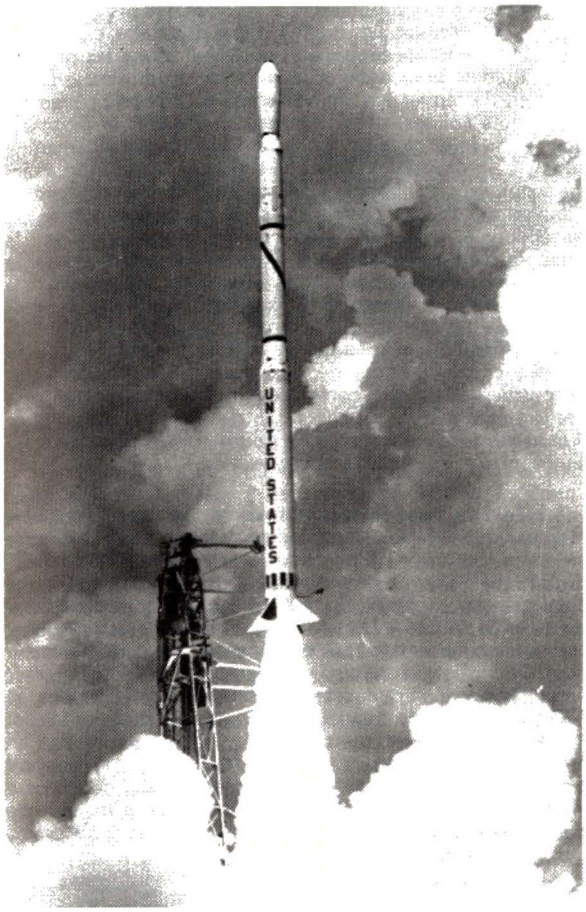


Fig. IX-2 — Départ du lanceur américain «Scout» à propergols solides

protéger ces dernières, soit assurer un refroidissement efficace qui peut être interne ou externe. Le refroidissement interne consiste à faire circuler, dans une double paroi entourant l'éjecteur, l'un des ergols, généralement le combustible; celui-ci est ainsi réchauffé avant son introduction dans la chambre de combustion. L'inconvénient majeur de cette technique est de créer des pertes de charge supplémentaires dans le circuit d'alimentation d'ergols. Elle est notamment utilisée sur le moteur-fusée Rocketdyne F-1 qui propulse le premier étage du lanceur Saturn V, le liquide de refroidissement étant l'hydrogène liquide, particulièrement efficace puisque sa température d'entrée est inférieure à — 200 °C. Le refroidissement externe repose sur l'interposition entre la paroi de la tuyère et les gaz de combustion d'un film liquide obtenu par ruissellement de combustible le long de la paroi ; il se vaporise en absorbant de la chaleur. Cette méthode, adoptée notamment sur le premier étage de Diamant B, est insuffisante pour les durées de fonctionnement importantes. L'échauffement le plus intense se situant au voisinage du col de la tuyère, cette partie est souvent recouverte de matériaux réfractaires (graphite, tungstène, etc.). Les divergents sont également réalisés en métaux réfractaires comme le molybdène, ou recouverts d'un revêtement de protection.

À titre d'exemple de lanceur à liquides, on donnera les caractéristiques principales du lanceur Saturn V utilisé dans le programme Apollo, et qui comporte trois étages, tous à propergols liquides :

— *Premier étage.* — Il comprend cinq moteurs à oxygène liquide et kérosène de 680 000 daN de poussée unitaire. La turbopompe assurant simultanément l'alimentation en comburant et en combustible développe une puissance de 60 000 ch (44 160 kW). La masse à vide est de 130,2 tonnes pour une masse totale de 2 137 tonnes, ce qui correspond à un indice constructif de 6 %.

— *Deuxième étage.* — Il comprend cinq moteurs à oxygène et hydrogène liquides de 90 000 daN de poussée unitaire. L'alimentation en ergols est également assurée par turbopompes, mais à raison d'une pour chaque ergol. Réservoirs et turbopompes sont évidemment communs pour les cinq moteurs. La masse à vide est de 32,9 tonnes pour une masse totale de 469 tonnes.

— *Troisième étage.* — Un seul moteur, identique à ceux du second étage. La masse à vide est de 9,9 tonnes pour une masse totale de 125,2 tonnes.

Toute assemblée, Saturn V constitue un ensemble de 2 730 tonnes de masse totale, haut de 85 mètres (sans le véhicule Apollo qui représente la charge utile) ; le diamètre maximal qui est celui du premier étage dépasse 10 mètres. La charge utile satellisable sur orbite basse atteint 120 tonnes.

1.1.2. Les fusées à propergols solides. — Dans ce type de moteurs, l'énergie propulsive provient de la combustion d'un bloc de poudre qui englobe comburant et combustible (fig. IX-2). On distingue deux classes de propergols solides : les propergols à double base et les propergols composites. Les premiers se caractérisent par le fait qu'ils constituent une phase solide unique. Ils sont généralement composés de nitrocellulose et de nitroglycérine dans un rapport variant de 70/30 à 50/50, auxquels on ajoute de faibles quantités de stabilisants ; on peut citer dans cette catégorie l'isolane et l'épictète. Leur emploi est plus spécialement réservé à des blocs de faible poussée. Les propergols composites, qui sont au contraire utilisés pour les fusées puissantes, incorporent le comburant et le combustible sous forme de deux phases distinctes ; le comburant est généralement un perchlorate alcalin (d'ammonium ou de potassium) et le combustible un polyuréthanne, auquel on associe souvent de l'aluminium en poudre et des adjuvants pour faciliter la coulée et stabiliser la combustion. L'impulsion spécifique des propergols solides est inférieure à celle des propergols liquides courants, puisqu'elle se situe aux alentours de 250 secondes, mais leur emploi se justifie néanmoins par leur plus grande facilité de mise en œuvre. Les blocs de poudre utilisés sur les lanceurs comportent une cavité centrale, et la combustion se propage radialement de l'intérieur vers l'extérieur. La section de la cavité est dessinée en fonction de l'évolution de la poussée que l'on souhaite obtenir (fig. IX-3) ; par exemple, la section de la cavité présente la forme d'une étoile pour une loi de poussée sensiblement constante en

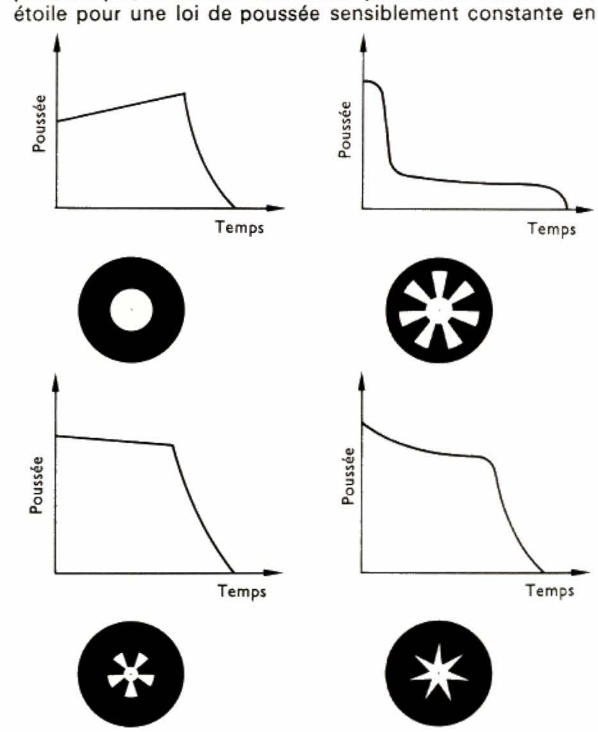


Fig. IX-3 — Courbes poussée-temps correspondant à différentes sections du cylindre de poudre

fonction du temps. Les blocs de dimensions importantes sont directement coulés à l'intérieur du corps de propulseur, la paroi interne de celui-ci étant préalablement revêtue d'un matériau organique servant de protection thermique contre les flux de chaleur intenses émis au cours de la combustion ; de plus, un revêtement supplémentaire, baptisé *liner*, permet de lier élastiquement le bloc de poudre à la structure.

Dans le domaine des lanceurs, les propulseurs à poudre sont surtout utilisés pour les lanceurs militaires, c'est-à-dire les missiles balistiques, qui doivent pouvoir être stockés pendant de longues périodes et être tirés sur commande sans vérification préalable. Tel est le cas des S.S.B.S. et M.S.B.S. (1) de la force de dissuasion française. Néanmoins, on doit également mentionner des boosters de décollage pour lanceurs civils; c'est ainsi que le lanceur américain Titan III C dispose de deux boosters de 545 tonnes de poussée unitaire. Certains étages supérieurs, comme le troisième étage des lanceurs Diamant A et B, et l'étage périgée-apogée du lanceur Europa font également appel à des propergols solides. Pour accroître la poussée développée, il a fallu augmenter les dimensions des blocs de poudre; aux États-Unis d'Amérique, on est arrivé à des blocs de longueur supérieure à 10 m et de 6 m de diamètre.

En ce qui concerne les structures métalliques, la réalisation des corps de propulseurs fait appel aux mêmes technologies que celle des réservoirs d'ergols pour fusées à liquides. Mais, pour accroître la légèreté, dans certains cas on utilise comme matériau de la fibre de verre dont la résistance à la traction dépasse 200 daN/mm². Après enrobage dans une résine phénolique qui sert de liant, les fibres sont alors bobinées (fig. IX-4) sur un mandrin de forme appropriée qui permet de réaliser la structure en une seule pièce, fonds y compris. C'est notamment selon ce principe qu'a été conçu le deuxième étage du missile M.S.B.S. français.

(1) S.S.B.S. : Sol Sol Balistique Stratégique ; M.S.B.S. : Mer Sol Balistique Stratégique.

Par rapport aux propulseurs à liquides, les propulseurs à poudre nécessitent un organe supplémentaire qui est le dispositif d'arrêt de propulsion ou D.A.P. Avec les propergols liquides, pour annuler la force de propulsion il suffit, en effet, de fermer les vannes d'arrivée d'ergols. Avec les propergols solides, il est impossible d'arrêter la combustion une fois celle-ci amorcée. Le dispositif imaginé consiste en une série d'opercules montés sur le fond avant du propulseur et libérables par un système pyrotechnique. L'ouverture de ces opercules, dont la section totale est supérieure à celle des tuyères arrière, stoppe et inverse la poussée bien que la combustion se poursuive ; si la charge utile a été préalablement désolidarisée du propulseur, elle continue avec la vitesse acquise, ce qui assure une séparation nette. Il est ainsi possible de programmer l'instant de cette séparation avec toute la précision désirable, et, en conséquence, la valeur de la vitesse finale. De plus, les propulseurs à poudre comportent un allumeur placé à la partie supérieure de la cavité centrale du bloc de poudre ; il consiste en deux charges de poudre mises à feu successivement par un circuit électrique.

1.1.3. Les fusées nucléaires. — La propulsion chimique, dont les principaux aspects viennent d'être passés en revue, se trouve limitée sur le plan des performances du fait que l'énergie de propulsion provient d'une réaction chimique des produits auxquels il appartiendra également de créer la poussée. Les réactions chimiques actuellement connues ne permettent pas de dépasser une certaine valeur pour l'énergie calorifique libérée par unité de masse ; l'impulsion spécifique est ainsi limitée à une valeur de 450 secondes environ qui correspond à des réactions faisant intervenir le fluor et ses composés, difficiles à mettre en œuvre. Pour dépasser cette valeur, il faut que l'apport d'énergie au fluide propulsif soit externe à celui-ci. On peut atteindre ce but en faisant circuler ce fluide à travers une pile nucléaire où il s'échauffe avant d'être détendu dans

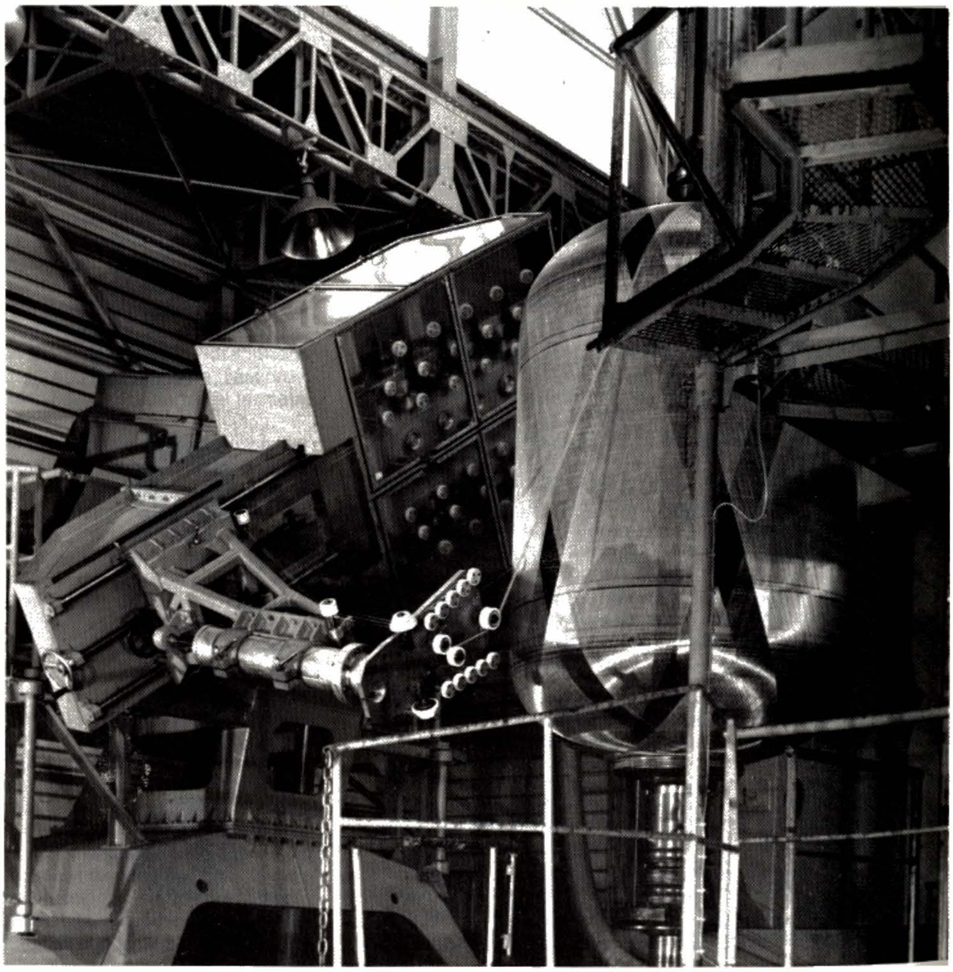


Fig. IX-4

Machine à bobiner à l'établissement d'Aquitaine de l'Aérospatiale (*Aérospatiale*)

une tuyère ; ce mode de propulsion est appelé *propulsion nucléaire*. La vitesse d'éjection du fluide propulsif s'exprime par la formule :

$$V_e = \sqrt{\frac{2\,\gamma\,R\,T_0}{\gamma - 1\,M}}$$

où T_0 désigne la température et M la masse moléculaire du fluide propulsif. La température T_0 peut prendre une valeur aussi élevée que le permet la technologie et, notamment, la tenue des matériaux en température. Pour accroître la vitesse d'éjection, donc la poussée, il y a intérêt à avoir un fluide de masse volumique aussi faible que possible, ce qui conduit au choix de l'hydrogène. Celui-ci est stocké à l'état liquide afin de réduire le volume des réservoirs. L'impulsion spécifique croît alors avec la température, mais avec certaines irrégularités liées à la dissociation de l'hydrogène moléculaire en hydrogène atomique au-delà de 2 000 °C. Depuis plus de vingt ans, un programme de recherches sur ce type de propulsion est en cours de développement aux États-Unis d'Amérique et il doit déboucher sur le moteur Nerva qui pourrait être utilisé sur un troisième étage de lanceur spatial à performances élevées. Le cœur du réacteur équipant ce moteur est constitué de barres en carbure d'uranium ; sa température, au centre, est de 2 500 K. L'hydrogène liquide est injecté dans ce cœur à l'aide d'une turbopompe entraînée par de l'hydrogène gazeux chaud prélevé à la sortie du cœur. La puissance thermique du réacteur nucléaire sera de 5 000 MW et la poussée du moteur-fusée de 100 000 daN. Comme sur les fusées à propergols liquides, la tuyère sera refroidie par circulation de l'hydrogène liquide dans une double paroi, avant son passage dans le réacteur. Bien entendu, de nombreux problèmes technologiques restent encore à résoudre, mais l'utilisation opérationnelle de ce moteur devrait être une réalité entre 1980 et 1990. À titre de comparaison avec la propulsion chimique, l'impulsion spécifique dépassera 500 secondes ; avec un réacteur nucléaire à cœur solide, elle est limitée à 1 000 secondes, et pour aller au-delà, il sera nécessaire d'adopter une technologie à cœur gazeux.

1.1.4. Les essais de mise au point. — Avant qu'un propulseur-fusée soit apte au vol, de nombreux essais sont nécessaires et exigent de disposer d'installations et de moyens de mesure adaptés. Parmi les principales de ces installations, on peut citer :

— les bancs d'essais hydrauliques permettant de timbrer les réservoirs d'ergols et les corps de propulseurs ;

— les bancs de tir, fixes ou mobiles, permettant de mesurer la poussée, d'essayer les dispositifs de déviation du jet, et de vérifier la stabilité de la combustion. En France, le banc de tir le plus puissant se situe au Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques de Vernon ; il permet d'essayer des moteurs de 100 000 daN de poussée.

1.2. La structure des lanceurs. — Un lanceur se compose donc d'étages successifs reliés entre eux par des jupes cylindriques ou tronconiques suivant que les étages ont même diamètre ou des diamètres différents. Au-dessus du dernier étage, se trouve généralement un élément cylindrique, appelé case à équipements, et qui contient tous les organes de guidage et de pilotage du lanceur qui seront décrits ultérieurement. C'est au-dessus de cette case que se trouve fixée la charge utile ; elle est recouverte d'une coiffe qui, dans le cas des lanceurs civils, sert à protéger la charge utile durant la traversée des couches denses de l'atmosphère lors du lancement. Dans le cas des missiles balistiques, la charge utile doit encore être protégée lors de la rentrée à très grande vitesse dans l'atmosphère car, au cours de cette phase, la partie avant de l'engin est soumise à des flux de chaleur très intenses. La coiffe est alors remplacée par un corps de rentrée conçu de telle sorte qu'il puisse absorber ces flux thermiques (fig. IX-5). Dans ce but, il est fait appel à des matériaux ablatifs qui se volatilisent avec absorption de chaleur ; compte tenu des impératifs de poids, ces matériaux ablatifs sont associés à une structure de base en nid d'abeilles. Les matériaux ablatifs sont généralement des amalgames de fibres de verre ou de silice et de résines phénoliques.

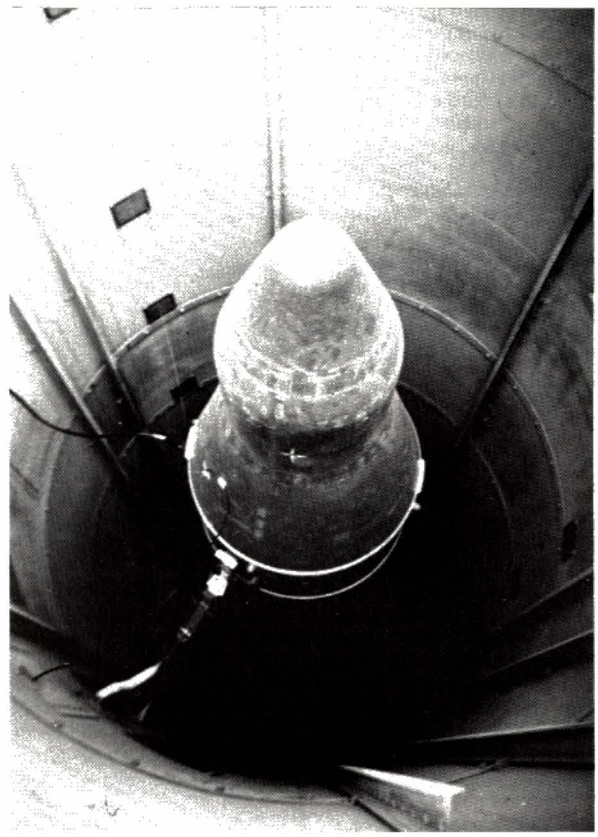


Fig. IX-5 — Corps de rentrée S.S.B.S. au silo (*Aérospatiale*)

1.3. La procédure de lancement. — Elle consiste à déterminer les phases de propulsion de chaque étage de telle sorte que la charge utile puisse être placée sur la trajectoire voulue, en l'occurrence d'obtenir à la fin du lancement un vecteur vitesse déterminé en module et en direction. Dans le cas d'une mise sur orbite terrestre, la vitesse finale doit être horizontale à l'altitude de l'apogée de l'orbite, la valeur de cette vitesse définissant alors l'altitude du périgée. La précision requise pour le module et l'inclinaison du vecteur vitesse est très grande, des erreurs voisines de 1 % suffisant pour déformer considérablement l'orbite prévue. Il faut donc pouvoir commander avec précision l'orientation du lanceur au cours de la phase propulsée. C'est le rôle du guidage (trajectoire du centre de gravité) et du pilotage (mouvement autour du centre de gravité ou *attitude*).

1.4. Le guidage. — Il comporte généralement deux phases nettement distinctes : un guidage continu tout au long du vol propulsé et des corrections apportées au cours de la trajectoire balistique.

En ce qui concerne la phase de vol propulsé, une première technique consiste à ne pas effectuer un véritable guidage mais à programmer, dans un calculateur du bord, une trajectoire préétablie sous forme d'une loi de variation de l'orientation de l'engin en fonction de l'altitude. Le calculateur élabore les ordres de pilotage correspondant au basculement ; il commande également l'arrêt de la propulsion des divers étages, leur séparation, et éventuellement la mise en rotation autour de leur axe pour assurer la stabilisation directionnelle en fin de lancement. Cette technique a été utilisée notamment pour les lanceurs Diamant A et Diamant B (limitée d'ailleurs aux deux premiers étages). Elle présente un avantage évident de simplicité, mais elle n'assure pas une précision rigoureuse des paramètres de l'orbite, en particulier de l'apogée sur lequel des erreurs supérieures à 100 km peuvent être enregistrées ; elle ne saurait donc être retenue pour les mises sur orbite circulaire. Elle est également peu adaptée au lancement de véhicules interplanétaires.

Une procédure de guidage plus élaborée consiste à suivre à partir du sol la trajectoire de l'engin et à la comparer à une trajectoire idéale définie avant le lancement; les écarts donnent alors lieu à des ordres correctifs transmis par télémesure à l'engin et concernant le pilotage et l'arrêt de la propulsion. Cette méthode est utilisée pour tous les lanceurs de véhicules interplanétaires et pour certains lanceurs de satellites, comme Europa I et Europa II. Elle nécessite évidemment l'implantation au sol de moyens de trajectographie développés. Ceux-ci comprennent essentiellement:

— Des radars mesurant la distance et l'altitude de l'engin.

— Des émetteurs-récepteurs Doppler qui permettent de mesurer la vitesse de l'engin.

— Des interféromètres radioélectriques à structure en L comprenant trois stations placées aux sommets d'un triangle rectangle; celle qui est située au sommet de l'angle droit est émettrice et réceptrice, alors que les deux autres sont uniquement réceptrices. Cet ensemble permet de mesurer la distance de l'engin à la station centrale et la différence des distances de l'engin à la station centrale d'une part, et aux deux stations auxiliaires, d'autre part.

En outre, les stations au sol doivent comporter des moyens de calcul importants qui traitent en temps réel les informations reçues concernant la trajectoire de l'engin.

La station de trajectographie est généralement située à plus de 1 000 km du point de lancement afin de se trouver le plus près possible de la verticale du point d'injection sur orbite, qu'il s'agisse de l'orbite définitive pour un satellite terrestre, ou d'une orbite d'attente dans le cas des lancements de véhicules spatiaux.

Par rapport à la précédente, cette méthode est beaucoup plus onéreuse. En outre, la situation géographique des champs de tir ne permet pas toujours de l'adopter; c'est le cas de la base française de Kourou en Guyane, les lancements devant s'effectuer vers l'Est pour profiter de la rotation de la Terre donc au-dessus de l'océan Atlantique où il est impossible d'implanter des stations de localisation.

Le guidage inertiel constitue une troisième solution. Il repose sur la mesure à bord de l'engin des accélérations du centre de gravité par rapport à trois axes fixes dans l'espace formant un trièdre de référence. Ces accélérations sont intégrées deux fois consécutivement pour déterminer les coordonnées du centre de gravité de l'engin. Le système de guidage comprend alors:

— une plate-forme inertielle à trois axes avec suspension à cardan; elle conserve une orientation fixe dans l'espace quels que soient les mouvements de l'engin grâce à trois gyroscopes de haute précision reliés à de petits servomécanismes qui commandent les corrections nécessaires. Cette plate-forme porte les trois accéléromètres; l'ensemble est appelé *centrale à inertie;*

— un calculateur de bord, qui effectue les intégrations, compare la trajectoire réellement suivie à une trajectoire idéale préétablie, et élabore les ordres de pilotage.

La précision obtenue est très bonne, les accéléromètres pouvant détecter des accélérations aussi faibles que le cent-millionième de la pesanteur; quant aux gyroscopes, leur dérive est maintenant inférieure à 0,01 degré par heure. Un tel système présente l'avantage d'être entièrement autonome et de n'offrir aucune prise au brouillage (d'où son intérêt pour les missiles balistiques). En revanche, il s'agit d'un système cher, du fait de la complexité des équipements embarqués. L'utilisation, dans de bonnes conditions, d'un système de guidage inertiel suppose que les coordonnées du point de lancement sont parfaitement connues. Pour les missiles M.S.B.S. qui sont tirés de sous-marins en plongée, la centrale inertielle de l'engin est

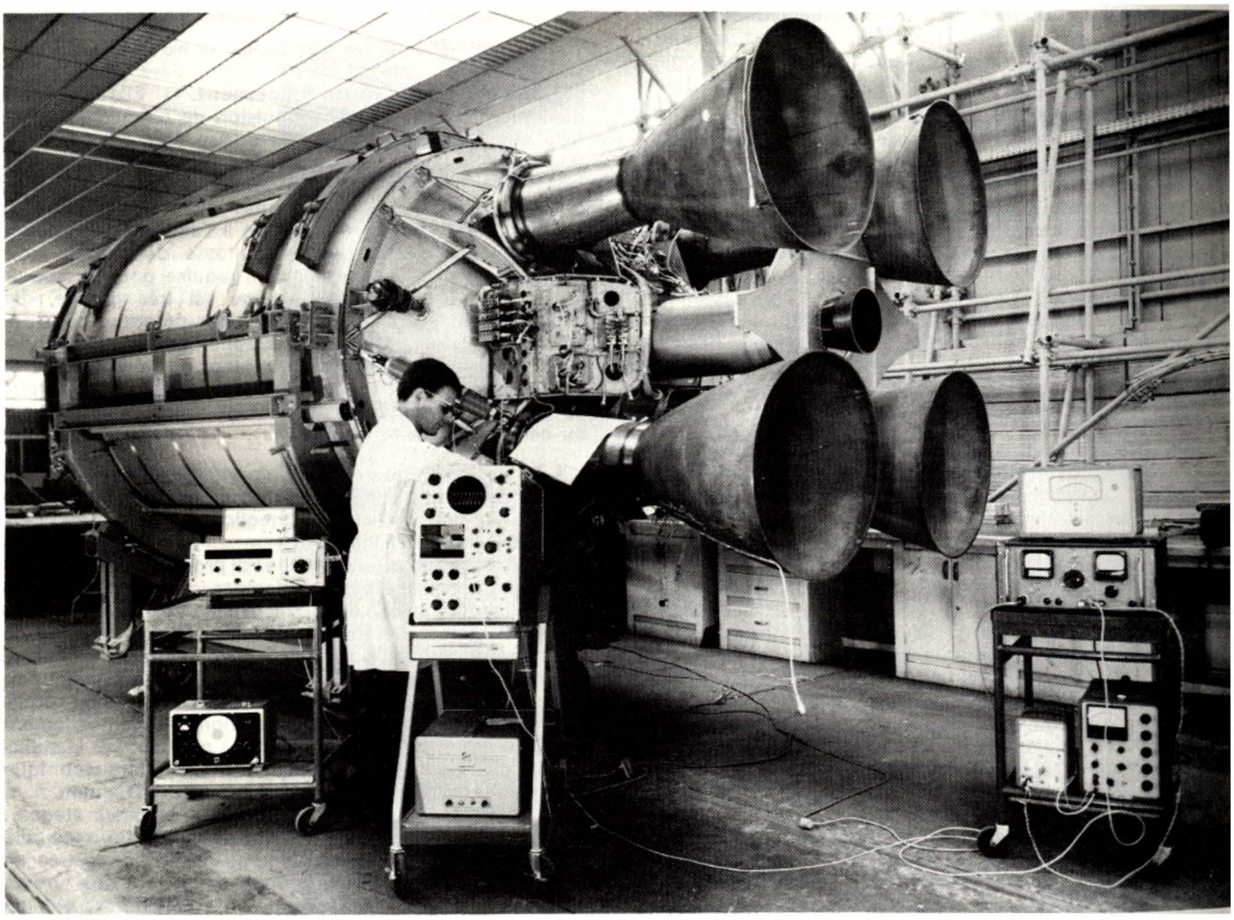


Fig. IX-6 — Intégration du second étage « Coralie » au lanceur Europa
(*Nord-Aviation*)

recalée au moment du tir par rapport à la centrale inertielle du sous-marin.

Les corrections apportées à la trajectoire au cours de la phase balistique sont fondamentalement différentes selon le type de lanceur. Dans le cas des missiles militaires, le guidage initial peut être considéré comme suffisamment précis pour que la correction finale se réduise à orienter convenablement le corps de rentrée au moment d'aborder les couches denses de l'atmosphère. Pour les lanceurs de véhicules spatiaux, en revanche, dont la trajectoire jusqu'au but visé peut être très longue, une ou plusieurs corrections intermédiaires sont nécessaires; elles consistent en impulsions de poussée créées par des moteurs-fusées et supposent que l'orientation de l'engin soit parfaitement définie. À titre d'exemple, lors des différents vols Apollo qui se sont succédé, il a généralement suffi d'opérer une correction pour chaque trajet Terre-Lune; pour cela on faisait fonctionner pendant un temps assez court le moteur principal du module de service. Dans quelques cas, une correction supplémentaire, plus limitée, a été exécutée à l'aide des moteurs de contrôle du module de service.

1.5. Le pilotage. — Le but du système de guidage est en fait d'agir sur la trajectoire de l'engin, par l'orientation du vecteur poussée. Ces actions, qui consistent donc à communiquer à l'engin des mouvements autour de son centre de gravité, constituent le pilotage. Comme la trajectoire se situe presque exclusivement dans des régions de l'atmosphère où la densité de l'air est très faible, donc négligeable, et dans le vide interplanétaire, il est impossible de recourir à l'emploi de gouvernes aérodynamiques; le pilotage s'obtient alors par actions sur les tuyères de propulsion. Le système de pilotage comporte un bloc de commande qui élabore les ordres correctifs et un bloc de puissance qui a pour tâche d'exécuter ces ordres.

Deux techniques sont essentiellement utilisées pour la déviation de la poussée: les tuyères mobiles et la déviation aérodynamique du jet. Le pilotage par tuyères mobiles se présente différemment selon que l'engin est mono- ou multituyères. Dans le premier cas, la tuyère est reliée à l'engin par l'intermédiaire d'un cardan à deux axes; le moteur peut être basculé autour de ces deux axes au moyen de vérins, ce qui fournit des couples de tangage et de lacet. Pour les couples de roulis on utilise de petites tuyères auxiliaires situées dans un plan perpendiculaire à l'axe du moteur. Dans le second cas, les tuyères, généralement au nombre de quatre, sont mobiles autour d'un axe faisant un certain angle avec leur axe de symétrie (fig. IX-6 et IX-7); en combinant convenablement les rotations de chacune des quatre tuyères il est possible de créer tous les couples de tangage, de roulis et de lacet nécessaires. Une nouvelle technique en cours de développement, baptisée *tuyère à joint flexible,* consiste à relier la tuyère à l'engin par un élément déformable autorisant la tuyère à certains débattements dans toutes les directions; cette solution permet d'éviter de difficiles problèmes d'étanchéité.

Le pilotage par déviation aérodynamique du jet consiste à injecter un fluide sous pression dans le jet, à la paroi de la tuyère. Cette injection crée un décollement du jet le long de la paroi au point d'injection, d'où une dissymétrie de l'écoulement et une déviation de la poussée dans la direction opposée au point de l'injection. Quatre orifices d'injection disposés à 90° les uns des autres sur le pourtour de la tuyère permettent d'engendrer tous les couples de tangage et de lacet, la commande des jets étant assurée par des servovalves. Pour des raisons de simplicité et de sécurité de fonctionnement, pour créer ces jets on utilise un liquide facile à manipuler comme le fréon. Les mouvements de roulis sont assurés par de petites fusées d'appoint comme sur les moteurs à tuyère unique mobile. Ce procédé a été utilisé sur certains étages de missiles balistiques, notamment le Polaris et le Minuteman américains ainsi que le M.S.B.S. français (fig. IX-8).

1.6. Les réalisations. — La gamme des lanceurs développés jusqu'à présent est très large, afin de satisfaire à la grande variété de missions à réaliser. Dans le domaine des lanceurs civils, les moins importants pèsent une vingtaine

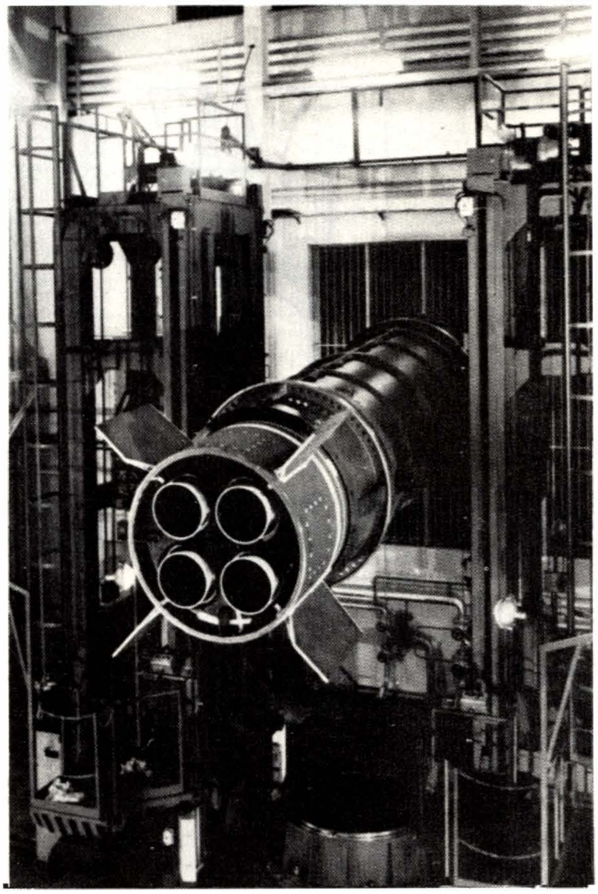


Fig. IX-7 — Premier étage S.S.B.S. (poudre) (*Aérospatiale*)



Fig. IX-8 — Second étage M.S.B.S. (*Aérospatiale*)

de tonnes au décollage ; c'est la classe de Diamant B, qui permet de placer sur orbite basse un satellite d'une centaine de kilogrammes. Diamant B combine la propulsion à liquides pour le premier étage et la propulsion à poudre pour les étages supérieurs. Dans la même gamme, on peut encore citer le Scout américain à quatre étages à propergols solides, dont la masse totale est de 17 t, et qui peut placer une charge de 130 kg sur orbite basse. Dans l'ordre des tonnages croissants, on trouve ensuite le lanceur Europa d'une masse totale de 104 t, qui devait mettre sur orbite géostationnaire le satellite de télécommunications franco-allemand Symphonie mais dont le développement a été abandonné (fig. IX-9). Puis, avec l'Atlas-Agéna, de 125 t au décollage, on aborde les lanceurs capables de satelliser

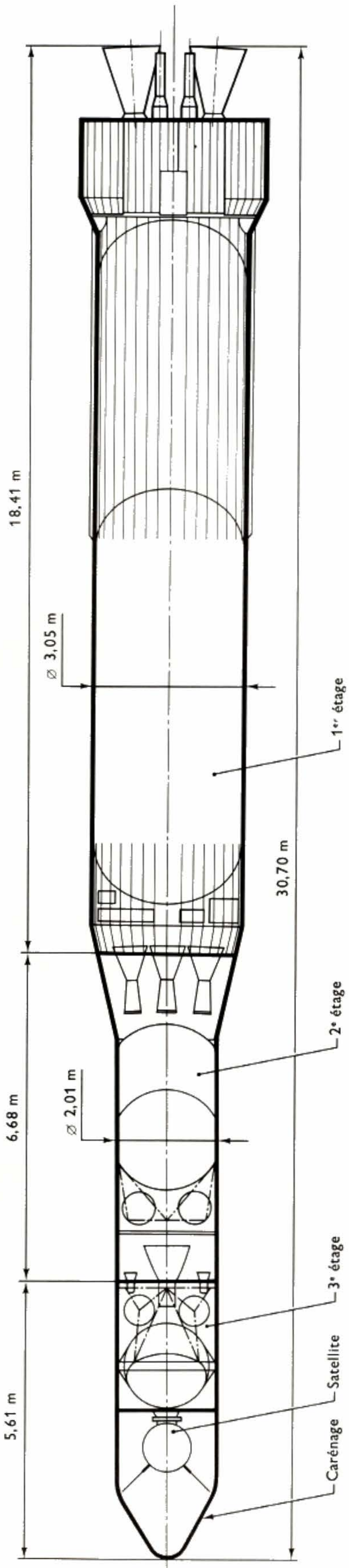


Fig. IX-9

Schéma d'un lanceur européen d'engins spatiaux du programme initial Cecles-Eldo

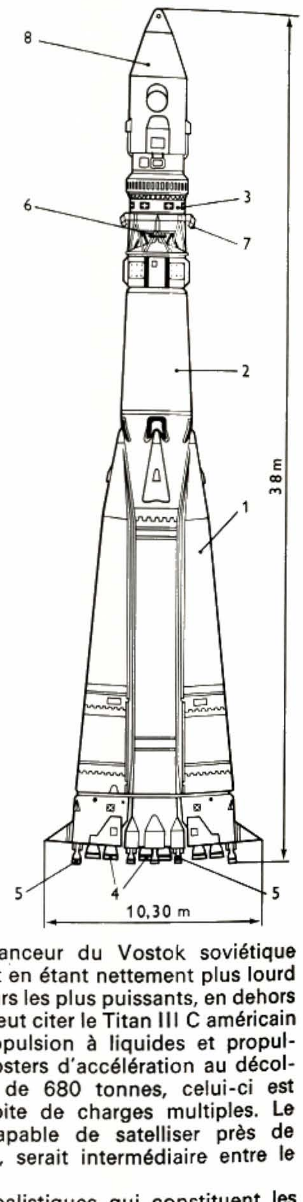


Fig. IX-10

Lance-satellite soviétique « Vostok »

1 : Propulseurs latéraux du premier étage
2 : Deuxième étage
3 : Troisième étage
4 : Tuyères des moteurs principaux des premier et deuxième étages
5 : Tuyères des moteurs de pilotage des premier et deuxième étages
6 : Tuyère du moteur principal du troisième étage
7 : Tuyères de pilotage du troisième étage
8 : Cône protecteur

des cabines habitées ; le lanceur du Vostok soviétique appartient à cette classe tout en étant nettement plus lourd (fig. IX-10). Parmi les lanceurs les plus puissants, en dehors du Saturn V déjà décrit, on peut citer le Titan III C américain qui combine également propulsion à liquides et propulsion à poudre (pour les boosters d'accélération au décollage) ; d'une masse totale de 680 tonnes, celui-ci est utilisé pour la mise en orbite de charges multiples. Le lance-Proton soviétique, capable de satelliser près de 15 tonnes sur orbite basse, serait intermédiaire entre le Titan III C et Saturn V.

La gamme des missiles balistiques qui constituent les lanceurs militaires est plus réduite. Ils sont classés suivant leur portée et en fonction de leur utilisation. C'est ainsi que l'on distingue les missiles sol-sol tirés de silos enterrés et les missiles mer-sol tirés de sous-marins en plongée. Dans la première catégorie, on peut citer le S.S.B.S. français de 3 000 km de portée et le Minuteman américain, qui peut atteindre un objectif situé à 13 000 km de distance. Les missiles mer-sol ont des portées plus faibles, car le sous-marin permet de les tirer plus près de l'objectif ; de plus, la nécessité d'en loger un certain nombre à bord du sous-marin implique d'en réduire les dimensions, ce qui

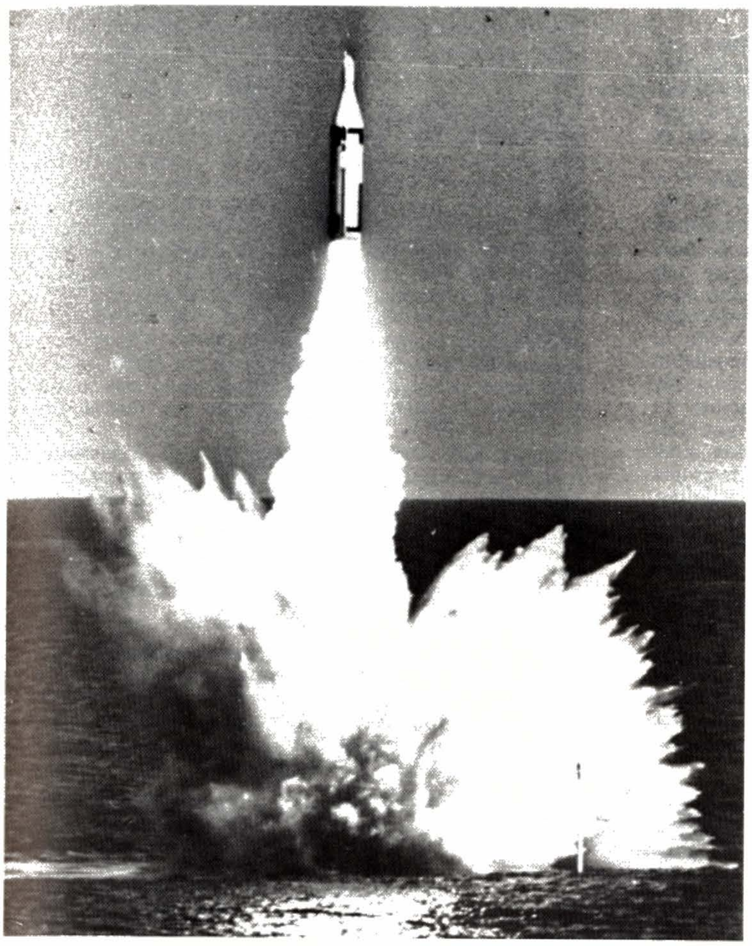


Fig. IX-11

Tir à partir d'un sous-marin en plongée d'un missile balistique américain « Polaris » (*Aérospatiale*)

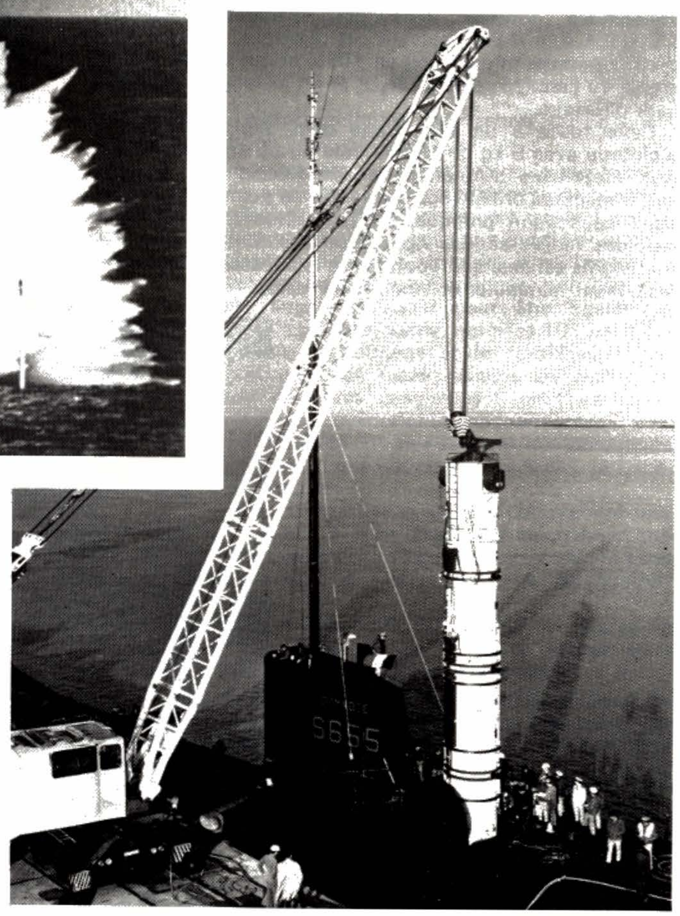


Fig. IX-12

Chargement d'un missile à bord d'un sous-marin (*Aérospatiale*)

se répercute sur les performances. C'est ainsi que le M.S.B.S. français a, dans sa première version, une portée de 2 000 km qui devrait être quelque peu accrue sur les versions ultérieures, alors que les Polaris et Poséidon américains portent jusqu'à 4 600 km. Lors du tir, les missiles sont chassés de leurs logements par de l'air comprimé qui leur communique une vitesse voisine de 100 km/h, et l'allumage du premier étage est effectué dès que le missile est entièrement sorti de l'eau (fig. IX-11). Quant aux sous-marins lanceurs d'engins, ils sont équipés de propulseurs nucléaires qui leur assurent une très longue autonomie (fig. IX-12). Tous ces missiles emportent des charges nucléaires miniaturisées de forte puissance.

Malgré leur vitesse de vol élevée, les corps de rentrée des missiles balistiques peuvent être interceptés par des antimissiles. Il faut donc leur donner les moyens de s'y soustraire. C'est ainsi que sont nées les aides à la pénétration qui constituent l'un des systèmes les plus importants liés aux corps de rentrée. Une première solution consiste à éjecter du corps de rentrée un nombre assez grand de petits éléments métalliques au moment de la rentrée dans l'atmosphère. Les échos qui leur correspondent sur les écrans des radars des systèmes antimissiles sont identiques à ceux du corps de rentrée lui-même, rendant ainsi très difficile son identification. Une deuxième méthode, plus efficace, consiste à décomposer la charge nucléaire d'un même missile en plusieurs charges de plus faible puissance, ce qui revient à multiplier le nombre de corps de rentrée et complique la tâche des systèmes de défense. On étudie aussi la possibilité de doter le corps de rentrée de gouvernes aérodynamiques afin de le rendre manœuvrable, mais cela nécessite qu'il soit également équipé d'un dispositif de guidage ; au cours de la rentrée il pourrait ainsi modifier sa trajectoire, voire changer d'objectif.

2. LES FUSÉES-SONDES

Les lanceurs militaires et spatiaux ne représentent pas l'ensemble des familles de fusées. Il faut encore leur ajouter les fusées scientifiques, également appelées fusées-sondes. Leur but est l'exploration de l'atmosphère jusqu'à une altitude de 2 000 km, c'est-à-dire bien au-delà de la limite atteinte par les ballons.

Ces fusées-sondes sont généralement constituées d'un ou deux étages à propulsion chimique. Certains de ces étages utilisent des lithergols, c'est-à-dire des combinaisons propergoliques dans lesquelles l'un des ergols, le plus souvent le comburant, est sous forme liquide, alors que l'autre est sous forme solide. De tels moteurs-fusées sont également baptisés *hybrides*. Ils combinent les avantages des propulseurs à poudre et à liquides, c'est-à-dire la mise en œuvre simplifiée des premiers et la possibilité d'extinction et de réallumage des seconds. Le combustible solide est emmagasiné directement dans la chambre de combustion dans laquelle est injecté le comburant. Les comburants sont l'acide nitrique et l'oxygène liquide, alors que comme combustibles, on utilise surtout des hydrures métalliques enrobés dans des matières plastiques. L'O.N.E.R.A. a réalisé, suivant ces principes, la fusée *Lex*, dont le premier tir a eu lieu en 1965, et qui utilise comme ergols du peroxyde d'azote N_2O_4 et un mélange d'amines à liant plastique.

Cette fusée à un seul étage peut atteindre 130 km d'altitude avec 5 kg de charge utile ou 95 km avec 11 kg. Aux États-Unis d'Amérique et en Suède, des moteurs expérimentaux ont été également mis au point, mais encore sans application pratique. En fait, actuellement, la plupart des fusées-sondes opérationnelles font appel à des propergols solides, qui répondent à la nécessité de pouvoir facilement manipuler et stocker les fusées.

Différents types de fusées-sondes :
On peut distinguer un certain nombre de catégories de fusées-sondes suivant leurs performances et leurs missions (fig. IX-13).

2.1. Les fusées météorologiques. — Ce sont les plus simples. Elles plafonnent à environ 120 km et n'ont pas besoin d'emporter plus d'une quinzaine de kilogrammes de charge utile. Par ailleurs, leur mise en œuvre doit être simple et leur prix le plus faible possible. Certaines de ces fusées sont mono-étages, ce qui fournit un engin très simple ; tel est le cas de la fusée américaine Arcas, qui culmine à 50 km, et de la fusée française Taramis. Celle-ci présente la caractéristique d'être semi-autopropulsée, c'est-à-dire qu'elle est lancée par canon, le moteur-fusée à poudre étant allumé à la sortie du canon. Néanmoins, sur le plan des performances, la fusée mono-étage est difficile à optimiser. Aussi, de nombreuses fusées-sondes sont-elles bi-étages. On peut citer en France les fusées Epona, Belisama, Bélénos, et en Angleterre, la Skua.

L'un des champs d'application les plus importants des fusées météorologiques concerne la détermination des paramètres atmosphériques dans les régions des champs de tir, avant chaque lancement de lanceur spatial ou de missile balistique ; ces paramètres peuvent se réduire à trois : température, pression et vitesse du vent. Les résultats enregistrés par les diverses sondes sont transmis au sol par radio (télémesure).

2.2. Les fusées d'exploration atmosphérique. — Elles ne se distinguent des précédentes que par leur charge utile qui est nettement supérieure et par leur possibilité d'atteindre des altitudes plus élevées. Elles ont pour but d'améliorer la connaissance de la haute atmosphère et de la stratosphère en étudiant les phénomènes qui s'y déroulent.

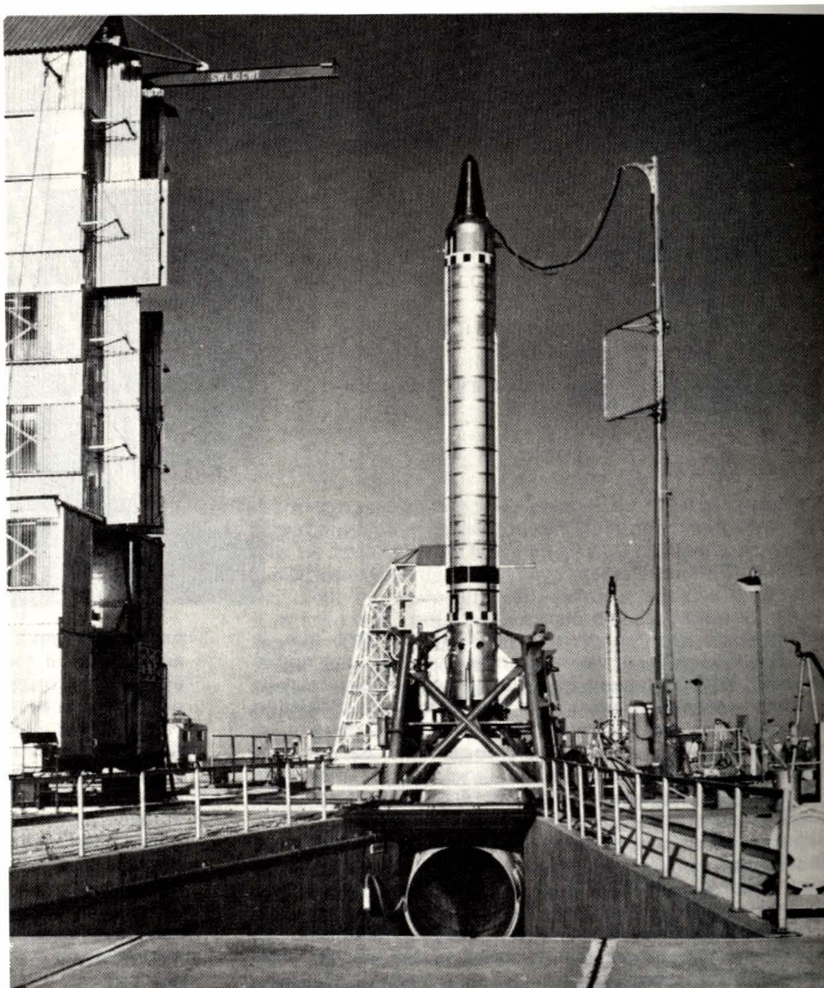


Fig. IX-13

Fusée-sonde à haute altitude Westland « Black Knight » (*Westland Aircraft Ltd*)

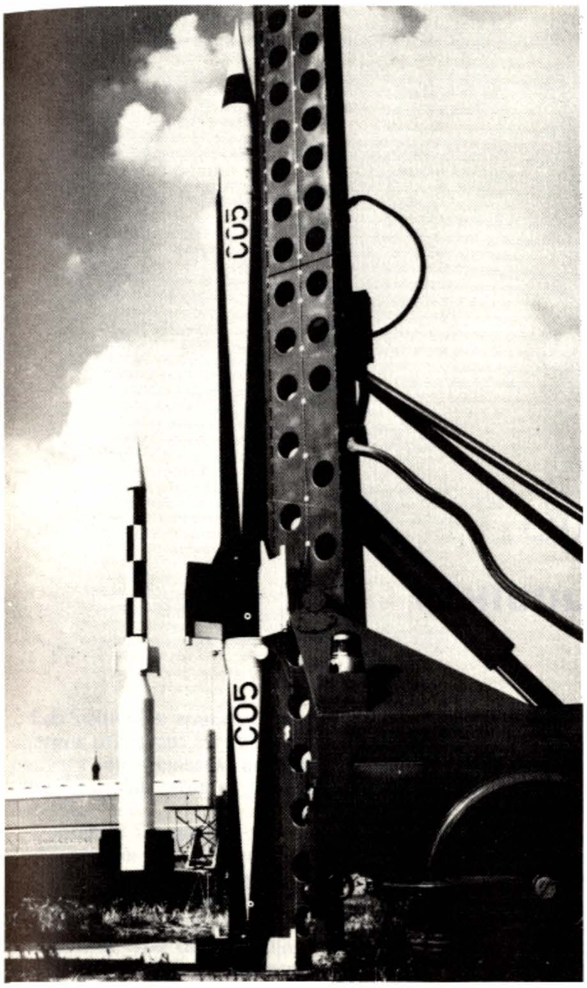


Fig. IX-14 — Fusée Centaure sur la rampe de lancement et fusée Dragon à l'arrière-plan (*Aérospatiale*)

Ces engins sont le plus souvent bi-étages, comme les Centaure, Dragon, Eridan de l'Aérospatiale (fig. IX-14); le plus important de cette famille, le Dragon III, qui pèse 1 184 kg au décollage peut emporter une charge de 30 kg à 750 km d'altitude. Toutes ces fusées sont constituées de sous-ensembles communs interchangeables, ce qui en diminue les prix de revient et les coûts d'utilisation. L'O.N.E.R.A. a également conçu une famille de fusées-sondes d'exploration qui va de la Tacite mono-étage à la Tibère à trois étages en passant par les Titus I et II. La fusée Tibère de 4 520 kg de masse au décollage culmine à une altitude comprise entre 1 950 km pour une charge utile de 100 kg et 425 km pour une charge de 600 kg. Cette fusée a été en particulier utilisée dans le cadre du programme Electre pour l'étude des phénomènes électriques relatifs au vol à très grande vitesse. Pour cette expérience, le troisième étage doit être réallumé au cours de la trajectoire de retombée. Ce troisième étage est l'étage terminal du lanceur Diamant, constitué d'une enveloppe en fibres de verre et résine; il est stabilisé par rotation autour de son axe longitudinal, cette rotation étant obtenue par un propulseur bituyère fournissant une impulsion totale de 1 200 daN.s.

La figure IX-15 donne les altitudes de culmination des diverses fusées réalisées par l'O.N.E.R.A., en fonction de la charge emportée. Parmi les nombreuses missions de telles sondes, on peut citer certaines études astronomiques, comme l'étude des phénomènes accompagnant les éclipses solaires.

Il faut également mentionner les fusées à liquides, Véronique et Vesta, étudiées par le Laboratoire de recherches

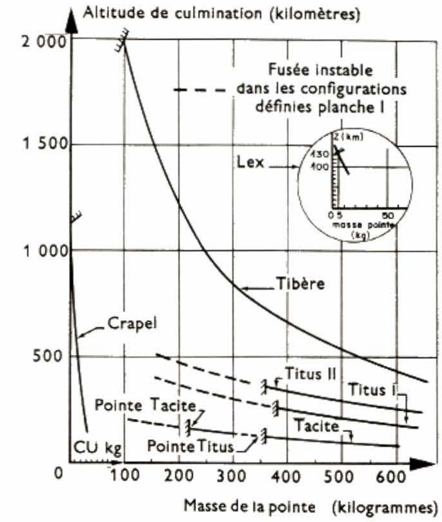


Fig. IX-15

balistiques et aérodynamiques de Vernon qui ont été largement utilisées jusqu'en 1966.

Parmi les équipements de cette catégorie de fusées-sondes, il faut faire une place à part au dispositif de pointage de la tête scientifique; en effet, il est très rare que la direction de visée des instruments embarqués soit indifférente pour l'étude d'un phénomène. Pour répondre à ce besoin, le C.N.E.S. a développé le système Cassiopée, qui offre des possibilités très larges, puisqu'il peut être également utilisé sur des satellites. Ce système, qui pèse 103 kg, a été conçu pour assurer le pointage et la stabilisation des pointes de la plupart des fusées-sondes de recherche scientifique, aux diamètres desquelles il peut s'adapter. Il se compose de blocs cylindriques indépendants:

— un bloc de pointage fin, comprenant des détecteurs interchangeables, pour l'orientation vers le Soleil, la Lune, ou un astre quelconque;

— un bloc de pointage gyroscopique, comprenant une centrale gyroscopique à trois axes, un calculateur qui élabore les ordres correctifs, un convertisseur statique pour l'alimentation électrique des précédents, et des équipements de servitude;

— une centrale pneumatique, qui exécute les ordres de corrections, et qui comporte un réservoir de gaz sous pression, des détendeurs et des électrovannes.

Suivant la mise en œuvre plus ou moins poussée de toutes les possibilités du système, il peut être utilisé en pointage grossier ou en pointage fin, et ce pendant une durée de 600 secondes.

2.3. Les fusées d'essais aérodynamiques. — Elles permettent de compléter par des essais en vol libre ceux réalisés en souffleries.

Pour l'exécution de ces essais, la fusée porte à l'extrémité de sa pointe la maquette à essayer; cette maquette est équipée de sondes de mesure des pressions, des vitesses, éventuellement de jauges de contraintes; toutes les mesures sont transmises au sol par radio. En France, l'O.N.E.R.A. a développé un certain nombre de ces fusées, et des résultats intéressants ont été obtenus dans le domaine de l'aérodynamique des grandes vitesses. Les mesures sont généralement réalisées au cours de la phase de vol qui suit immédiatement l'arrêt de la propulsion.

Le lancement des fusées-sondes se fait le plus souvent, exception faite pour celles de plus grandes dimensions, à partir du chariot de transport lui-même. À cet effet, les fusées sont montées sur un chariot élévateur que l'on peut incliner à volonté, ce qui permet de choisir l'angle de tir en fonction des conditions atmosphériques et de la mission. Cette technique permet, en outre, de tirer les fusées de n'importe quel point, ce qui est particulièrement intéressant pour les fusées de sondage météorologique.

CHAPITRE X

VÉHICULES SPATIAUX

Les véhicules spatiaux constituent en quelque sorte les charges utiles des lanceurs civils étudiés précédemment et peuvent être classés en trois catégories : les satellites terrestres, les sondes interplanétaires et les véhicules habités.

Depuis le lancement du premier Spoutnik, le 3 octobre 1957, un très grand nombre de véhicules spatiaux ont été envoyés dans l'espace pour répondre à des missions très diverses. Néanmoins, les problèmes techniques posés par leur réalisation peuvent être envisagés globalement, quel que soit le type de véhicule, avec parfois quelques particularités pour ce qui concerne les véhicules habités.

1. L'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE

L'alimentation en énergie fait principalement appel à deux types de générateurs.

1.1. Les générateurs solaires. — Ils sont de très loin les plus utilisés. Les générateurs solaires reposent sur la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique au moyen de cellules à semiconducteurs (silicium dopé au bore et au phosphore) ; le rendement de conversion est de quelques pour cent (V. t. 1, Autres sources d'énergie électrique). Les satellites sont ainsi dans certains cas recouverts sur une grande partie de leur surface d'une multitude de petites plaquettes de silicium (dont le nombre dépasse parfois 10 000) (fig. X-1) ; dans d'autres cas, ces plaquettes sont montées sur des panneaux de grandes dimensions repliés le long du satellite pendant la phase de lancement, et qui se déploient après la mise en orbite. La mise au point de nouvelles cellules en couches minces au sulfure de cadmium ou au tellurure de cadmium permettra d'améliorer le rendement (des valeurs de l'ordre de 7 % sont envisagées), de réduire le poids du générateur, et surtout d'améliorer la tenue aux radiations, donc la durée de vie de l'ensemble (fig. X-2 et X-3). Les générateurs solaires ne peuvent évidemment fonctionner que lorsqu'ils sont soumis à un éclairement suffisant, c'est-à-dire pendant une partie seulement du trajet sur orbite. Ils sont donc utilisés pour recharger des accumulateurs électriques classiques qui fournissent une énergie d'appoint, notamment

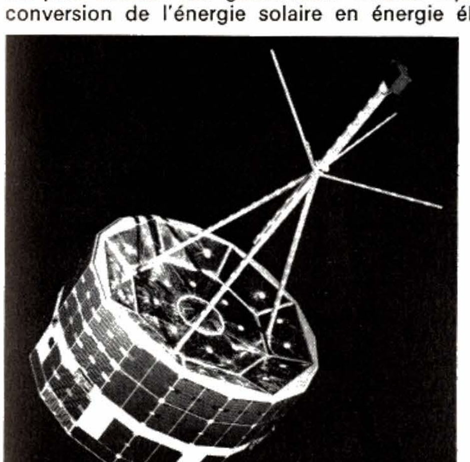


Fig. X-1 — Satellite Héos de l'E.S.R.O. (*British Aircraft Corporation*)

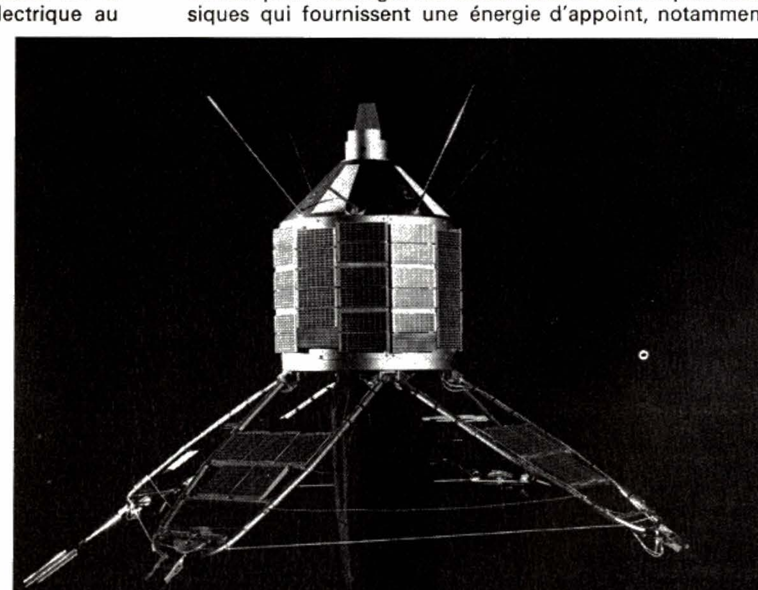


Fig. X-2

Satellite britannique Ariel (*British Aircraft Corporation*)

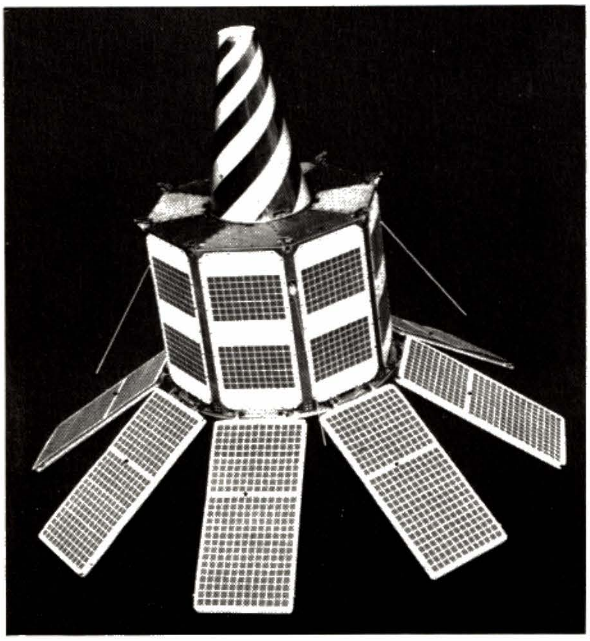


Fig. X-3 — Éole (*Aérospatiale*)

lorsque le satellite traverse des zones d'ombre. À titre d'exemple, pour les satellites de télécommunications importants comme les Intelsat IV, la puissance électrique installée est voisine de 500 watts. Compte tenu de l'encombrement des panneaux solaires nécessaires au développement de puissance de plus en plus grandes, des panneaux enroulables, qui puissent être facilement logeables à l'intérieur des coiffes de lanceurs, sont à l'étude.

1.2. Les générateurs d'énergie électrique de type nucléaire. — Ils font appel à la conversion en électricité de la chaleur produite par des désintégrations nucléaires. Ils ont déjà donné naissance à un certain nombre de réalisations expérimentales, notamment aux États-Unis d'Amérique dans le cadre du programme SNAP (*System Nuclear of Auxiliary Power*), mais ils n'ont, pour la plupart, pas encore atteint le stade des applications pratiques (V. t. 1, Autres sources d'énergie électrique). En réalité, ces systèmes peuvent être répartis en deux catégories suivant la nature des désintégrations auxquelles ils font appel : décomposition de substances radioactives naturelles ou artificielles et réactions nucléaires dans une pile nucléaire. Parmi les premiers, il faut citer le SNAP 27 qui utilise comme radioélément du plutonium 238. D'une puissance initiale de 75 watts (elle reste pratiquement constante pendant toute la première année de fonctionnement), il a fourni l'énergie nécessaire à l'ALSEP, autrement dit à l'ensemble des appareils pour les expériences Apollo à la surface de la Lune. La conversion de la chaleur en électricité est obtenue par des thermocouples à semiconducteurs généralement réalisés en tellurure de plomb. D'autres radioisotopes peuvent être utilisés, notamment le polonium 210, le curium 242 et le cérium 144 ; le choix dépend de la période de radioactivité de l'élément, qui est elle-même conditionnée par l'application envisagée. L'inconvénient majeur de ce type de générateur est la limitation en puissance, qui ne permet pas de les envisager pour l'alimentation des gros satellites ou des stations spatiales de l'avenir. Au contraire, les générateurs à pile nucléaire sont très intéressants de ce point de vue, car la soudure chaude des thermocouples peut être portée à une température de plusieurs centaines de degrés. Un certain nombre d'essais ont déjà été effectués par la NASA, notamment avec le SNAP 10-A, qui délivre une puissance électrique de 500 watts pour une masse totale de 113 kg ; ce générateur a été testé en fonctionnement sur orbite en assurant l'alimentation électrique d'un petit moteur ionique. Mais, ce n'est que pour des puissances beaucoup plus importantes, voisines d'une dizaine de kilowatts que ce processus de génération électrique sera intéressant. Pour les véhicules spatiaux habités, une puissance électrique importante est également nécessaire ; or, il est difficile d'envisager le recours à des générateurs nucléaires, la masse des dispositifs de protection contre les radiations étant prohibitif.

1.3. Piles à combustible. — Une solution intéressante du problème est alors fournie par les piles à combustible à hydrogène-oxygène, qui présentent en outre l'avantage appréciable de produire de l'eau pure (V. t. 1, Autres sources d'énergie électrique). Les piles à combustible reposent sur le phénomène inverse de l'électrolyse, l'énergie chimique dégagée par la réaction hydrogène-oxygène étant transformée en énergie électrique. C'est ainsi que sur le véhicule Apollo, trois piles à combustible développent une puissance totale de 1,5 kW pour une masse de 40 kg ; l'électrolyte est une solution de potasse à 85 %, et les piles fonctionnent sous une pression de 4 bars et à une température de 240 °C. Dans le cadre de la mission lunaire, ces piles produisaient 230 litres d'eau par semaine, ce qui était largement suffisant pour la consommation des astronautes. Bien entendu, ce mode de production d'énergie implique d'emporter à bord les réserves d'oxygène et d'hydrogène nécessaires, sous forme liquide pour réduire le volume des réservoirs.

Tous les dispositifs précédents sont associés à des batteries chimiques classiques qui servent de secours et de complément.

2. LA STABILISATION

Un second problème fondamental pour l'utilisation des véhicules spatiaux concerne la stabilisation (V. chap. 3). La procédure de lancement se borne, en effet, à définir exactement le mouvement du centre de gravité de l'engin, mais le mouvement autour de ce centre de gravité (attitude) n'est pas déterminé et dépend de facteurs aléatoires. Or, de nombreuses missions ou opérations nécessitent que la position par rapport à la Terre, au Soleil ou à d'autres astres soit parfaitement définie. Les procédés de stabilisation d'attitude actuellement utilisés peuvent être classés en deux catégories : les procédés passifs et les procédés actifs.

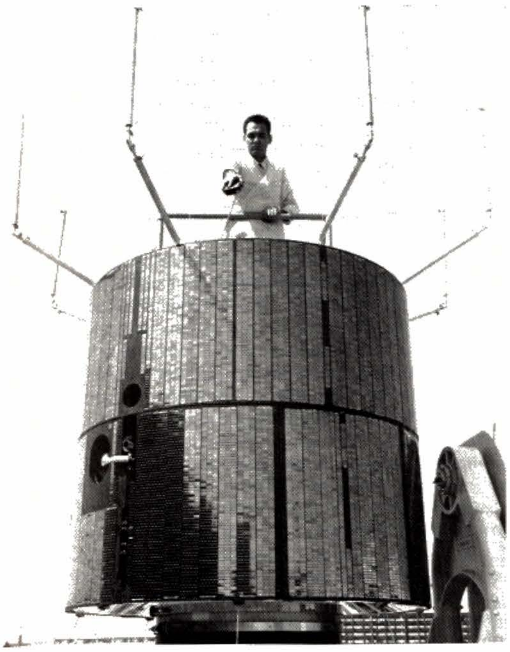
Dans la première catégorie, le procédé le plus courant est la stabilisation par effet gyroscopique. Elle consiste à mettre l'engin en rotation rapide autour de son axe longitudinal ; suivant la théorie des gyroscopes, cet axe conserve une direction fixe dans l'espace quelles que soient les évolutions qui lui sont imposées. C'est ainsi que, lors de leur mise en orbite, les satellites Diamant tournaient sur eux-mêmes, leur fréquence de rotation atteignant 270 tours par minute. La position de l'axe reste fixe par rapport à l'espace absolu, mais par rapport à la Terre, il pivote de 360° au cours d'une révolution.

La stabilisation active consiste à détecter les variations d'attitude par rapport à un système de références et à développer des couples correcteurs. Le système le plus employé est le système à jets de gaz.

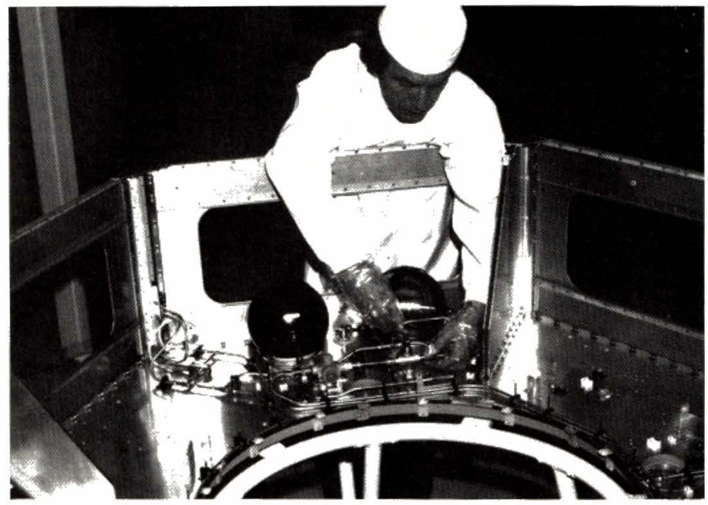
Un système de stabilisation complet comprend, outre des moyens d'exercer les couples correcteurs, des détecteurs qui permettent de préciser l'orientation réelle du véhicule spatial par rapport à des références convenablement choisies. Le choix des détecteurs dépend de la mission. Néanmoins, presque tous les systèmes de stabilisation utilisent comme référence le Soleil et sont constitués de cellules photosensibles associées à un dispositif optique. En dehors du Soleil, on peut mentionner comme autres références spatiales, la Terre, la Lune et quelques étoiles.

3. LE CONTRÔLE THERMIQUE

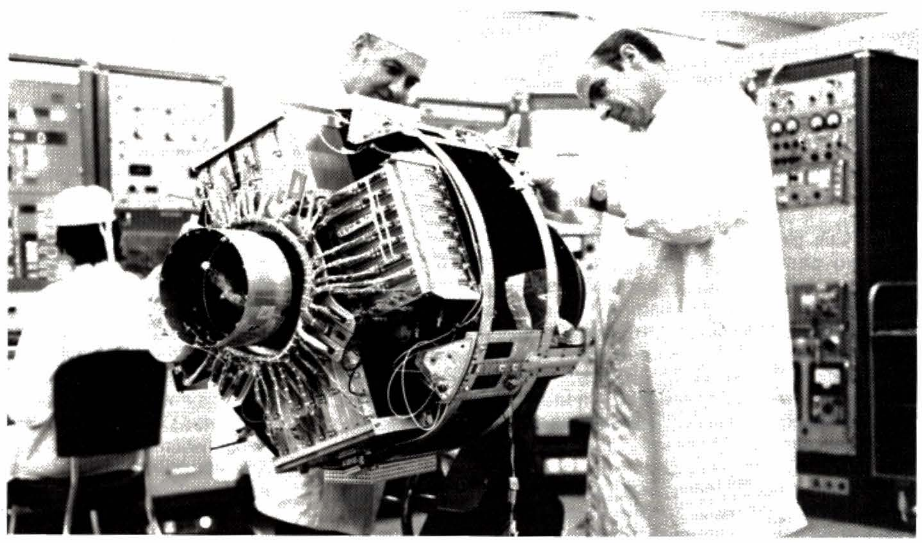
Dans l'espace, où règne un vide poussé, les échanges thermiques se font essentiellement par rayonnement. Les flux de chaleur échangés avec l'extérieur par les divers éléments d'un véhicule spatial, et notamment d'un satellite, sont donc fondamentalement différents suivant que ces éléments sont exposés ou non au rayonnement solaire. Il peut en résulter des différences de température importantes entre ces éléments, se traduisant par des échanges thermiques par conduction. Le but du contrôle thermique



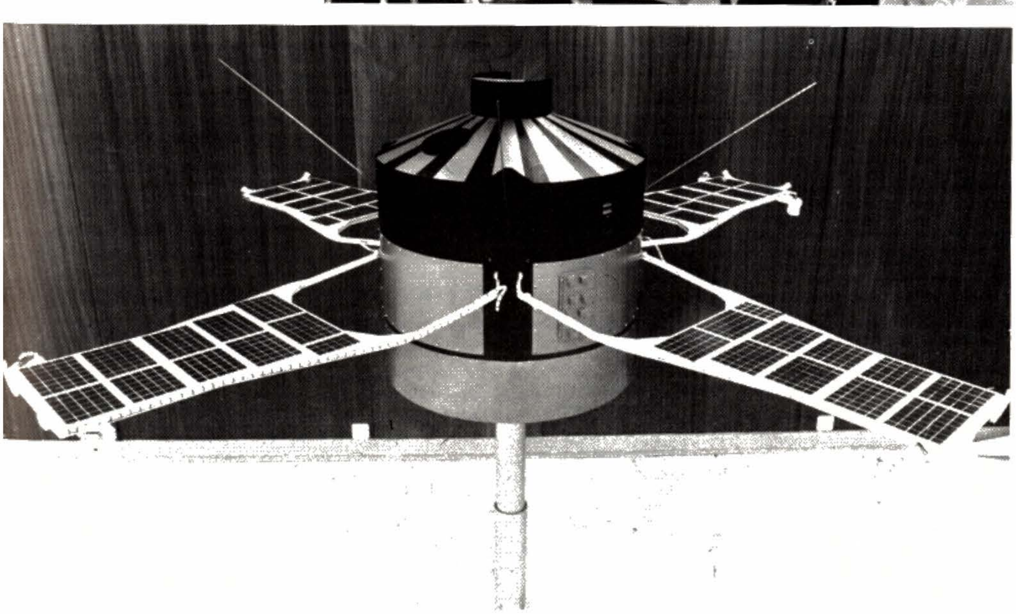
Un des ATS, satellites d'applications technologiques (*Hughes Aircraft Corporation*)



Moteur de stabilisation par gaz froids de Symphonie (*Aérospatiale*)



Montage du satellite D-2B (lancement depuis Kourou en fin 1974) (*Matra*)



Satellite D-2B (*Matra*)

est de maintenir chacun des équipements du véhicule spatial dans sa plage de températures de fonctionnement, quelles que soient les conditions de vol. On y parvient en ajustant les coefficients de conductivité des différentes parties du véhicule et les coefficients d'émissivité de la surface, notamment en recouvrant cette dernière de peintures spéciales. Mais, comme les échanges thermiques varient constamment du fait de la trajectoire et de la position du véhicule sur cette dernière, cette méthode de contrôle passif n'est généralement pas suffisante, et il faut faire appel à une méthode active qui consiste à faire varier les propriétés optiques de la surface à l'aide d'écrans dont le déplacement est commandé automatiquement par les variations de température.

4. LA PROPULSION

La propulsion des véhicules spatiaux fait bien entendu appel au moteur-fusée, mais elle prend des aspects très différents suivant la nature des applications. Tout d'abord, on retrouve les fusées chimiques adoptées pour la propulsion des lanceurs, et que l'on utilise dans une large gamme de poussées (de quelques décanewtons à plusieurs milliers). Par exemple, le module lunaire du véhicule Apollo comporte deux propulseurs à liquides, l'un pour l'étage de descente sur la Lune, et l'autre pour l'étage de remontée; la poussée du premier varie entre 400 et 600 daN, alors que celle du second est de 1 500 daN. Le moteur de descente est évidemment utilisé en freinage, ce qui justifie que sa poussée puisse varier afin de s'adapter à la vitesse de descente résiduelle à annuler. Mais des propulseurs spécialement adaptés aux véhicules spatiaux sont en cours de développement; il s'agit de *propulseurs électriques,* que l'on peut répartir en trois groupes: les *propulseurs électrothermiques, les propulseurs ioniques* et les *propulseurs à jet de plasma*. Les deux derniers types de moteurs se caractérisent par l'éjection à grande vitesse de particules électrisées jouant le rôle de fluide propulsif.

4.1. Les propulseurs électrothermiques. — Ils font appel au chauffage à très haute température par un arc électrique d'un fluide, généralement de l'hydrogène. L'énergie électrique de l'arc est transformée en énergie cinétique des molécules de fluide qui sont ensuite détendues dans une tuyère. On peut ainsi atteindre des vitesses d'éjection de 10 000 à 15 000 m/s. Les problèmes technologiques à résoudre portent sur la résistance thermique des matériaux constituant la tuyère et sur la tenue des électrodes de l'arc électrique.

4.2. Les propulseurs ioniques. — Dans ces propulseurs on crée des ions positifs en arrachant à des atomes d'un gaz de masse atomique moyenne, comme le césium, un ou plusieurs électrons; ces ions positifs sont ensuite accélérés par des champs électriques. Les performances sont limitées par le phénomène de charge d'espace, c'est-à-dire par la charge négative accumulée par le véhicule, qui crée un champ électrique opposé au champ accélérateur. De tels moteurs ont déjà été testés dans des conditions de vol orbital, notamment au cours du programme américain SERT.

4.3. Les propulseurs à jet de plasma. — Ils utilisent comme fluide propulsif un mélange d'ions et d'électrons globalement neutre, ce qui élimine le problème de la charge d'espace; l'ionisation est obtenue par un champ électrique, et l'accélération des particules électrisées, par un champ magnétique perpendiculaire à la fois au champ électrique et à l'axe de la tuyère. Les flux d'ions et d'électrons se déplacent en sens inverses sous l'effet du champ électrique, mais ils sont accélérés dans le même sens par le champ magnétique, du fait de leurs charges opposées. De tels moteurs pourraient permettre d'atteindre des vitesses d'éjection de plusieurs dizaines de kilomètres par seconde.

Le problème principal, lié à la mise en œuvre de tous ces moteurs, réside dans le besoin de sources d'énergie électrique offrant une puissance élevée par unité de masse, et ce, pour une gamme de puissances supérieures au kilowatt. La solution est liée à la mise au point de générateurs d'énergie électrique de type nucléaire, analogues au SNAP 50 américain dont l'étude se poursuit, et dans lesquels une pile nucléaire de petites dimensions délivre de l'énergie thermique convertie ensuite en électricité. Par ailleurs, les propulseurs électriques seront limités à des poussées relativement faibles.

5. LES STRUCTURES

Leur conception dépend dans une grande mesure du type de véhicule considéré et de la mission qui lui est affectée. Partant, les solutions techniques retenues sont assez variées. Néanmoins, parmi les exigences communes à tous les types d'engins spatiaux, on peut mentionner en premier lieu la légèreté qui conduit à faire appel à des matériaux pour lesquels le rapport de la résistance mécanique à la masse volumique soit le plus grand possible (V. chap. 4), et notamment aux matériaux composites à base de résines renforcées par des fibres de verre ou de silice, et aux matériaux sandwiches.

Les satellites et les sondes spatiales sont le plus souvent constitués à partir d'une structure en forme de cylindre ou de prisme droit; les équipements et appareillages expérimentaux nécessités par la mission sont fixés sur des plateaux perpendiculaires à l'axe du satellite. C'est ainsi, par exemple, qu'a été conçu Symphonie, satellite de télécommunications constitué d'un prisme hexagonal, sur la

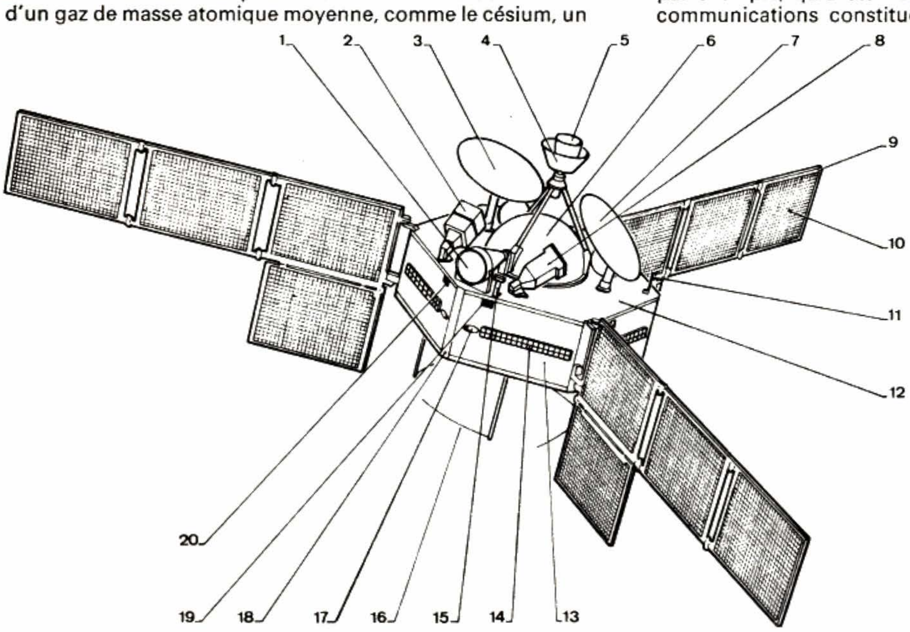


Fig. X-4

Schéma du satellite Symphonie

1: Cornet de réception
2: Source — Antenne d'émission pour la zone américaine
3: Réflecteur parabolique — Antenne d'émission pour la zone américaine
4: Écran thermique
5: Tuyère du moteur d'apogée
6: Réservoir du moteur d'apogée
7: Réflecteur parabolique — Antenne d'émission pour la zone euro-africaine
8: Source — Antenne d'émission pour la zone euro-africaine
9: Panneau solaire déployé
10: Cellules solaires
11: Senseur solaire
12: Revêtement superisolant
13: Carénage latéral
14: Cellules OSR (Optical Solar Reflector)
15: Senseur solaire
16: Antenne VHF
17: Trou pour le passage de la tuyère pour gaz froid
18: Case d'équipements
19: Senseur infrarouge
20: Senseur infrarouge

face supérieure duquel sont montés les principaux sous-systèmes (fig. X-4). Du fait de la place réduite sur les lanceurs, de nombreux éléments des véhicules spatiaux doivent être conçus pour pouvoir être dépliés une fois sur orbite, ou sont réalisés sous forme expansible. Un exemple de telles structures a déjà été donné avec les panneaux solaires, lorsque les cellules ne recouvrent pas seulement le pourtour du satellite ; on peut encore citer les antennes de télécommunications, les mâts portant les masses pour la stabilisation par gravité, etc.

Dans les cas de déploiement, il est nécessaire de prévoir un mécanisme de blocage, afin d'empêcher un repliement intempestif. En ce qui concerne le choix des matériaux, on peut signaler que le bon fonctionnement de certains équipements requis par la mission impose parfois que la structure du satellite soit amagnétique.

Dans le cas des engins devant se poser sur des planètes, la réduction de vitesse avant l'atterrissage est obtenue à l'aide de rétrofusées exerçant une action de freinage, et dont le contrôle est assuré par un radioaltimètre très précis ; lorsque la planète possède une atmosphère, des parachutes peuvent également être utilisés en complément. La structure de l'engin doit être calculée pour résister au choc à l'atterrissage. Sur la sonde lunaire américaine Surveyor, par exemple, la partie inférieure devant amortir le choc était constituée de trois jambes munies d'amortisseurs hydrauliques et terminées par des pieds en nid d'abeilles.

Sur certaines sondes, et notamment les engins planétaires soviétiques Zond, on note l'existence de deux compartiments distincts, l'un qui contient tous les équipements nécessaires au fonctionnement de la sonde le long de sa trajectoire, et l'autre dans lequel se trouvent les appareils destinés à l'étude de la planète visée. Le second compartiment peut même, dans certains cas, se séparer du premier une fois la sonde en orbite autour de la planète et venir se poser en douceur sur le sol.

Les véhicules habités posent également un certain nombre de problèmes particuliers. En premier lieu, leur structure doit résister à la différence entre la pression interne nécessaire à la vie des cosmonautes et la très faible pression régnant dans l'espace, ainsi que contre toute pénétration accidentelle de météorites. Lorsque des sorties de cosmonautes dans l'espace sont prévues, le véhicule doit être équipé de sas permettant la sortie sans qu'il y ait communication directe entre l'intérieur de la cabine et l'espace.

Dans de nombreux cas, les véhicules habités sont conçus pour permettre des opérations de rendez-vous dans l'espace et comportent une partie mâle et une partie femelle pouvant s'emboîter l'une dans l'autre. Cette technique du rendez-vous sera à la base de la mise en œuvre des grandes stations orbitales de la décennie des années 80.

Les capsules habitées qui doivent revenir sur Terre en parfait état et qui abordent les couches denses de l'atmosphère à des vitesses de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par heure posent le problème de la protection contre l'échauffement lors de la rentrée. Dans ce but elles sont munies d'un bouclier thermique constitué d'un matériau à forte capacité thermique (qui joue le rôle de puits de chaleur) recouvert d'une couche de matériau ablatif comme les ogives des missiles balistiques. Sur la capsule Apollo, la partie externe du bouclier thermique est constituée de nid d'abeilles d'acier inoxydable recouvert d'une couche de résine phénolique.

6. GUIDAGE ET NAVIGATION SPATIALE

Le choix d'un procédé de guidage dans l'espace est fonction des caractéristiques de la mission.

La navigation par inertie est inapplicable, les accéléromètres ne pouvant mesurer les accélérations dues à la gravitation ; cela limite l'emploi de ce procédé aux phases de vol propulsées. Le guidage radio, en revanche, est utilisable jusqu'à des distances de plusieurs centaines de milliers de kilomètres, grâce aux progrès accomplis dans le domaine des émetteurs-récepteurs, notamment en ce qui concerne le rapport du signal au bruit, et aux possibilités des amplificateurs paramétriques (V. t. 2, Télécommunications, chap. 3). C'est ainsi que des sondes solaires américaines ont été suivies sur la totalité de leur orbite, tel Pioneer V auquel des ordres étaient adressés par *télécommande* à une distance de 13 millions de kilomètres. Différents types de guidage radio peuvent être envisagés : interférométrie analogue à la technique utilisée pour les lanceurs, *tracking* (poursuite) par des antennes paraboliques de grandes dimensions et utilisation de l'effet Doppler. Ce dernier permet, par comparaison de la fréquence d'une onde émise au sol et de la fréquence de l'onde réfléchie sur le véhicule, de calculer la vitesse de celui-ci. Il est évidemment nécessaire de disposer d'émetteurs de fréquence très stable ; actuellement, des oscillateurs basés sur les vibrations atomiques permettent d'atteindre une stabilité de 10^{-11} (V. chap. 13).

La technique radar a également été adoptée pour les opérations de rendez-vous dans l'espace.

Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la Terre un autre procédé prend une importance croissante : le guidage stellaire. Il utilise tous les rayonnements émis par des corps célestes dont la position est bien déterminée dans l'espace. Si l'on considère une planète P et une étoile E (à l'infini), on peut dire que le véhicule S se trouve sur un cône de sommet P, d'axe PE, et dont le demi-angle au sommet est le supplément de l'angle compris entre les directions SP et SE. Avec deux planètes et deux étoiles différentes, on définit sans ambiguïté le point cherché. Le véhicule doit emporter un télescope pour viser les astres. La précision dépend de la dimension des cellules détectrices et de la distance focale du télescope, mais elle doit être la plus élevée possible, car une erreur d'une seconde d'arc dans la mesure des angles suffit pour entraîner un écart de 1 000 km dans la position du véhicule. D'autres difficultés inhérentes à ce système, sont liées aux très faibles énergies des rayonnements reçus, qui impliquent de recourir à des amplificateurs paramétriques. En définitive, l'avenir des systèmes de guidage spatial réside sans doute dans l'utilisation de systèmes mixtes, tels qu'un système astronomique Doppler.

7. CRITÈRES PARTICULIERS AUX TÉLÉCOMMUNICATIONS SPATIALES

Les télécommunications constituent un aspect important de l'utilisation des véhicules spatiaux, qu'il s'agisse de transmettre les informations et les ordres nécessaires au guidage et à l'exécution de la mission, ou mieux encore, que les télécommunications soient l'objet direct de la mission. Les difficultés liées à la distance ont déjà été signalées, ainsi que les moyens d'y remédier. Pour l'émission et la réception des ondes, les engins spatiaux disposent de deux types d'antennes, des antennes omnidirectionnelles, généralement utilisées pour la réception des ordres émanant de la Terre, ou pour l'émission lorsque l'engin n'est encore qu'à une faible distance, et une antenne à haut gain utilisable pour les émissions émanant du véhicule lorsque celui-ci est à une grande distance de la Terre. Cette dernière antenne doit alors être pointée avec une extrême précision vers la Terre, et l'on utilise à cette fin des capteurs identiques à ceux assurant le contrôle d'attitude des véhicules spatiaux, et dont les indications commandent l'orientation de l'antenne. (V. t. 2, Télécommunications, chap. 3).

Néanmoins, lorsque le véhicule est un satellite qui tourne d'un mouvement régulier par rapport au centre de la Terre, comme un satellite de télécommunications géostationnaire, par exemple, il est nécessaire de prévoir un système de contre-rotation de l'antenne, pour que, par combinaison des deux mouvements, l'axe de l'antenne reste fixe par rapport à la Terre. Deux possibilités se présentent : contre-rotation mécanique et contre-rotation électronique. La première solution a été adoptée sur les satellites Intelsat ; elle nécessite la mise au point de roulements de grande fiabilité. La seconde solution évite de recourir à des organes tournants ; elle fait appel à une antenne constituée d'éléments rayonnants disposés suivant les génératrices d'un cylindre dont l'axe est l'axe de rotation du satellite. Au fur et à mesure que le cylindre tourne sur lui-même avec le satellite, les génératrices sont successivement commutées à l'émetteur de telle sorte que la génératrice rayonnante soit toujours celle qui est dirigée vers le bas. Le mouvement de commutation est synchronisé par un programmeur avec les mouvements

de stabilisation du satellite; de plus, il est possible de modifier la commutation afin de diriger le faisceau vers un point différent du globe terrestre, ce qui, dans le cas d'un satellite de télécommunications, peut permettre des retransmissions successives vers plusieurs zones très éloignées les unes des autres.

8. INTÉGRATION ET ESSAIS

Lorsque tous les sous-systèmes d'un véhicule spatial sont mis au point, il reste encore à les assembler et à effectuer leurs réglages ainsi que les contrôles permettant de vérifier que le véhicule est apte à remplir la mission qui lui est imposée. Il faut notamment s'assurer que ces divers éléments sont compatibles entre eux, c'est-à-dire que leur fonctionnement n'est aucunement perturbé par des éléments voisins, tant du point de vue mécanique que radioélectrique ou magnétique (fig. X-5). C'est l'ensemble de ces opérations qui constitue l'*intégration*. Elle s'effectue dans une salle spéciale, dite *salle blanche*, dont l'atmosphère est complètement filtrée et maintenue dans des limites convenables de température et d'hygrométrie. En effet, des altérations, même mineures, de la structure ou des équipements peuvent être la cause d'une dégradation des performances ou d'un abaissement de la durée de vie de l'engin.

Cette phase d'intégration nécessite du personnel très qualifié, un temps relativement long et d'importants moyens matériels. Par ailleurs, la mise au point d'un véhicule spatial nécessite, particulièrement dans le cas des satellites, l'exécution d'essais dans les conditions d'ambiance spatiale. Ces essais sont réalisés avec une maquette rigoureusement identique aux modèles de vol (fig. X-6). Ils se déroulent dans des chambres de simulation spatiale permettant de reproduire aussi exactement que possible les deux principaux paramètres d'ambiance spatiale, c'est-à-dire le vide et le rayonnement solaire. Pour reproduire un niveau de vide élevé, on utilise deux pompes montées en série, une pompe primaire de type classique, et une pompe secondaire, à diffusion, ou cryogénique; ces dernières font appel à la condensation des gaz résiduels de l'enceinte sur des parois très froides (maintenues à des températures de 15 à

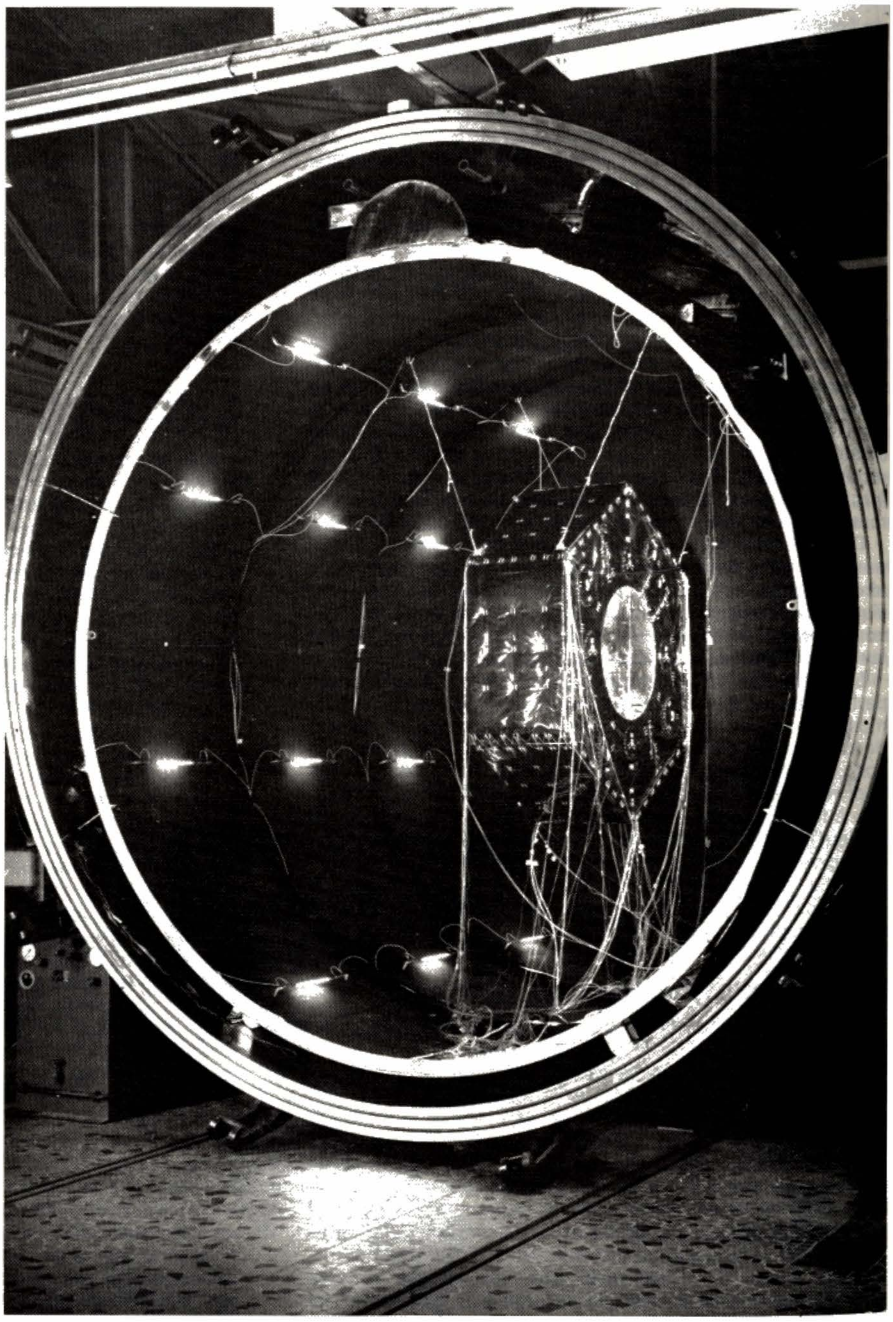


Fig. X-5

Essais de superisolation pour le satellite Symphonie en caisson de simulation spatiale (*Aérospatiale*)

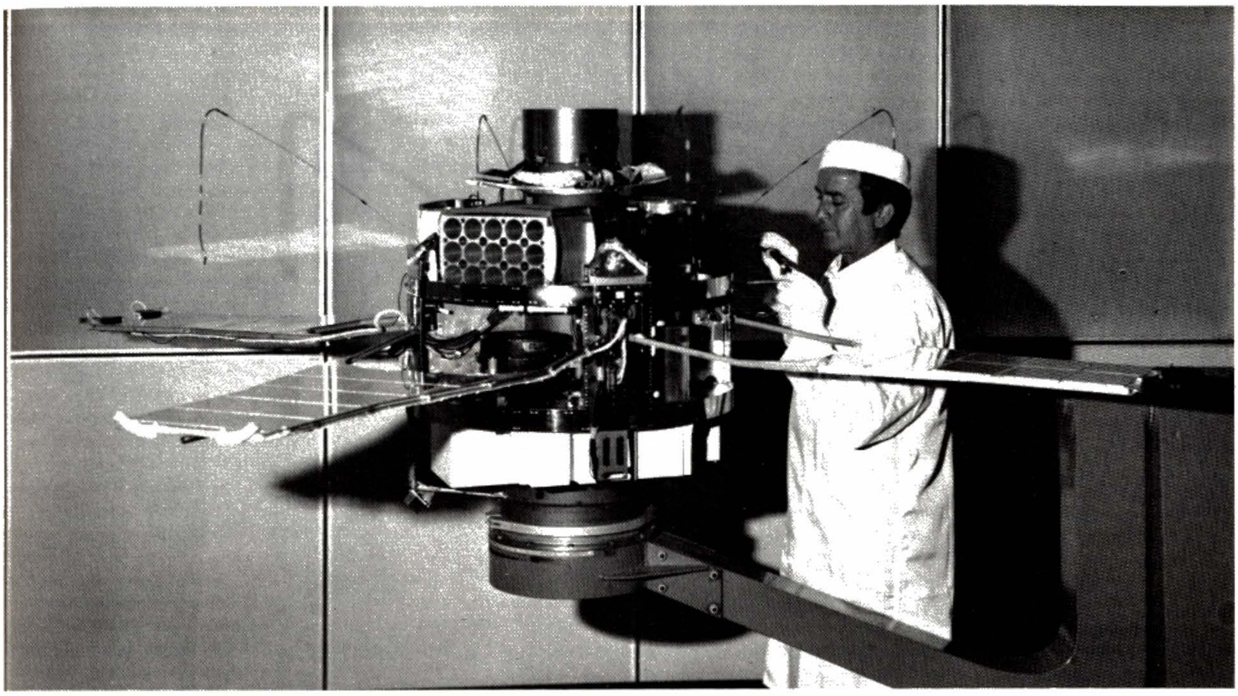


Fig. X-6 — Modèles d'essais mécaniques du satellite D 2-B

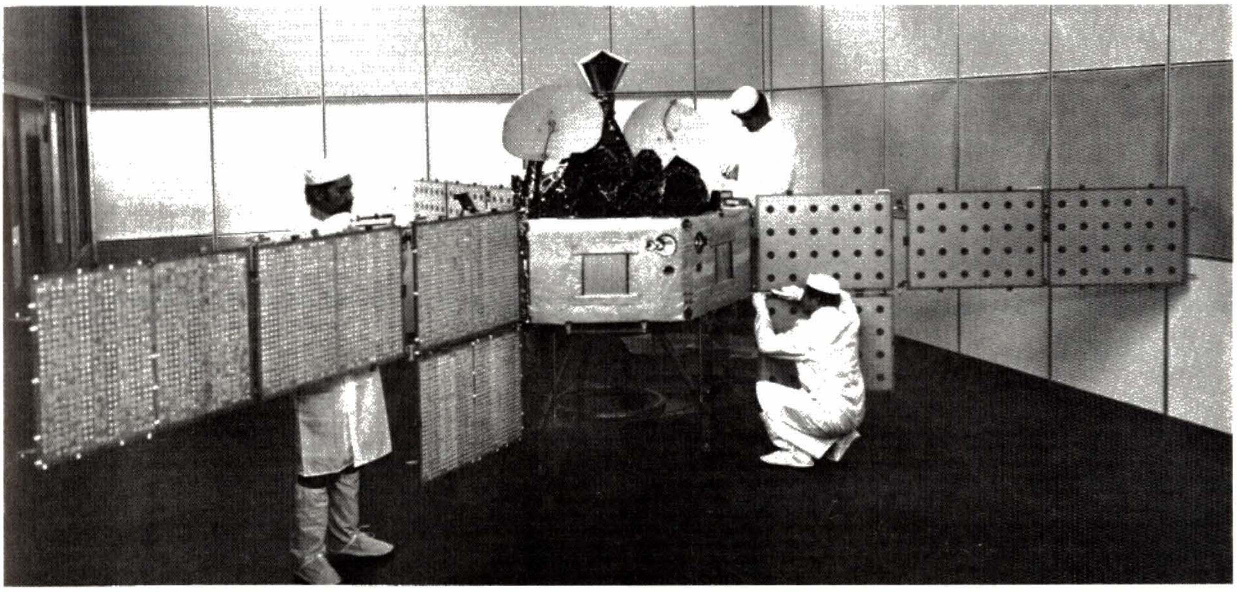


Fig. X-7 — Satellite Symphonie, maquette mécanique (*Aérospatiale*)

20 K par de l'hélium liquide). On parvient ainsi à atteindre des niveaux de vide voisins de 10^{-9} torr ($1,333 . 10^{-7}$ pascal). La simulation du rayonnement solaire est obtenue à l'aide de lampes à arc associées à des systèmes optiques focalisateurs. Le rayonnement solaire représente une énergie de 1 400 W/m² au voisinage de la Terre, le spectre se rapprochant de celui d'un corps noir à 6 000 K. Les lampes à arc peuvent être, soit des lampes au xénon, soit des lampes à arc de carbone; les secondes, bien que plus représentatives, sont rarement employées par suite de leur faible durée de vie. En France, le C.N.E.S. a développé à Toulouse un simulateur spatial de très grandes dimensions; conçu pour recevoir le satellite de télécommunications franco-allemand Symphonie (fig. X-7), il est actuellement le plus grand simulateur d'Europe. Il comporte une chambre de simulation de 7,5 m de diamètre, dans laquelle une installation de pompage comprenant une pompe cryogénique et une pompe turbomoléculaire permet d'atteindre un niveau de vide de 10^{-8} torr ($1,333 . 10^{-6}$ pascal). Le puits thermique est refroidi à l'azote liquide. Le simulateur de rayonnement solaire, constitué d'une trentaine de lampes au xénon de 6,5 kW de puissance unitaire, permet de concentrer une puissance de 2 kW/m² sur un diamètre de 3 m. Ce simulateur est entièrement automatisé en ce qui concerne la conduite des essais et le dépouillement des mesures.

Pour les essais de fonctionnement de certains équipements, il est parfois utile de reproduire les conditions d'impesanteur qui existent sur orbite. Des simulateurs spéciaux ont donc été conçus, dont un exemple est fourni par l'installation de l'O.N.E.R.A.; celle-ci repose simplement sur la mise en chute libre, dans une tour de 47 m de hauteur, d'une cabine contenant le matériel à essayer. Lors de la chute, tous les objets contenus dans la capsule ne reposent plus sur leur support, et tout se passe comme si la pesanteur était supprimée. Cette installation a permis notamment l'étude du comportement des liquides en état d'impesanteur.

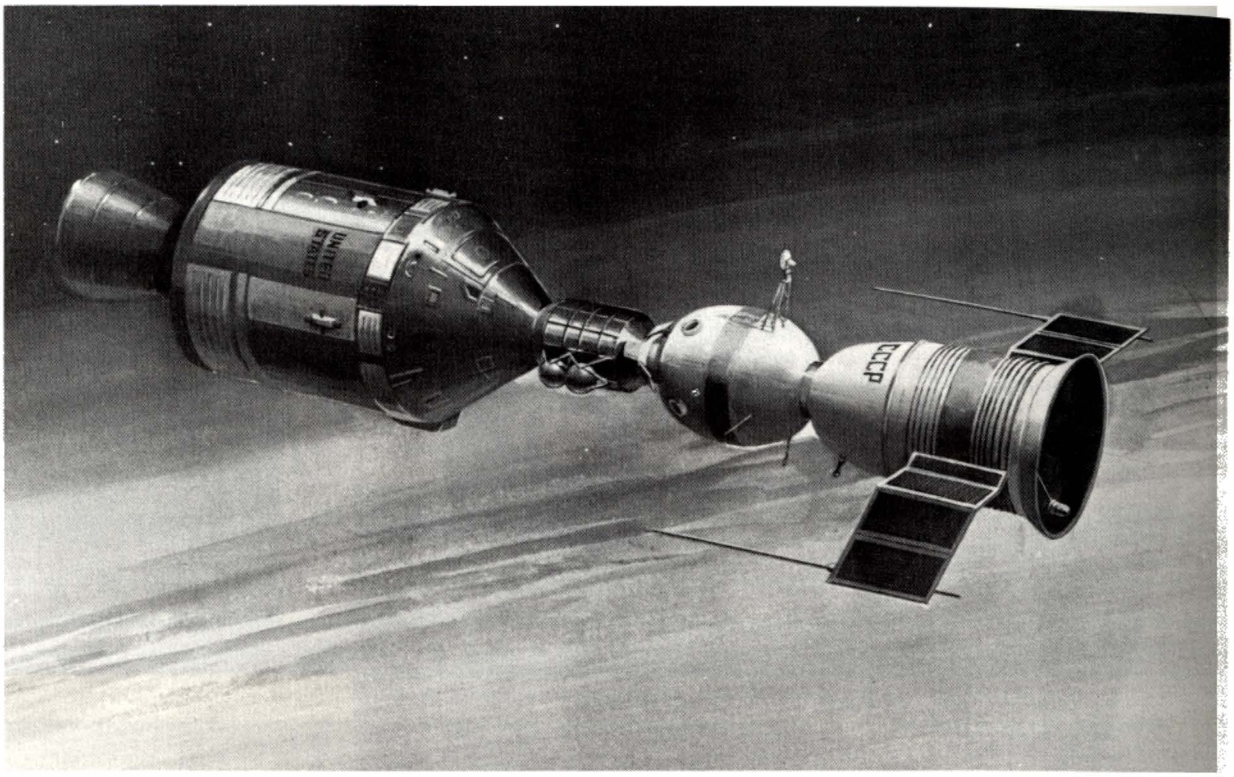


Fig. X-8 — Projet d'une mission internationale : le module de commande et le module de service Apollo (É.-U.A.) à gauche, sont reliés au véhicule spatial Soyouz (U.R.S.S.) à droite (*Rockwell International*)

9. UN EXEMPLE : LE VÉHICULE APOLLO

Les débuts de l'exploration de l'espace circumterrestre et de la Lune par des véhicules habités ont fait appel à des capsules spatiales de faibles dimensions susceptibles de prendre place à la partie supérieure des lanceurs disponibles. Depuis les premières cabines Mercury et Vostok, la technologie a considérablement progressé, et le véhicule Apollo témoigne de l'évolution enregistrée (fig. X-8).

L'ensemble du véhicule rassemble trois modules distincts :

— le module de service,

— le module lunaire (fig. X-9),

— le module de commande ou cabine Apollo proprement dite.

9.1. Module de service. — Le module de service se présente sous la forme d'un cylindre de 3,90 m de diamètre et de 6,70 m de hauteur, qui contient le système de propulsion principal, les réservoirs d'ergols et le système de génération d'énergie électrique. Le système de propulsion principal est constitué par un moteur-fusée à liquides de 9.10^3 daN de poussée, utilisant comme ergols du tétraoxyde d'azote et un mélange 50/50 d'hydrazine et d'UDMH (diméthylhydrazine asymétrique). Le système de génération d'énergie électrique fait appel à trois ensembles de piles à combustible fournissant du courant continu sous 26 volts à trois convertisseurs formant une alimentation triphasée (400 Hz, 115-200 V). Les piles à combustible, qui consomment de l'hydrogène et de l'oxygène, ont pour rôle secondaire de fournir l'eau potable destinée aux cosmonautes. La structure de ce module comporte essentiellement des panneaux en nids d'abeilles d'aluminium, afin d'en réduire la masse qui est de 24 t au moment du départ. Le module de service est utilisé à trois reprises : pour effectuer les corrections au cours du vol vers la Lune, pour satelliser l'ensemble Apollo sur orbite lunaire, et pour désatelliser ce qui reste de cet ensemble lors du retour vers la Terre. Il est largué avant la rentrée de la cabine Apollo dans l'atmosphère terrestre.

9.2. Module lunaire. — Le module lunaire pèse 14,5 t, a un diamètre de 4 m et une hauteur de 6 m ; il se compose lui-même de deux parties : l'étage de descente et l'étage de remontée. Le premier est équipé d'un moteur-fusée dont la poussée peut varier entre 500 et 4 000 daN et qui assure le freinage au cours de la descente vers la Lune ; le contrôle de la poussée est assuré par un radioaltimètre qui fournit constamment la distance de l'engin au sol lunaire. Pour

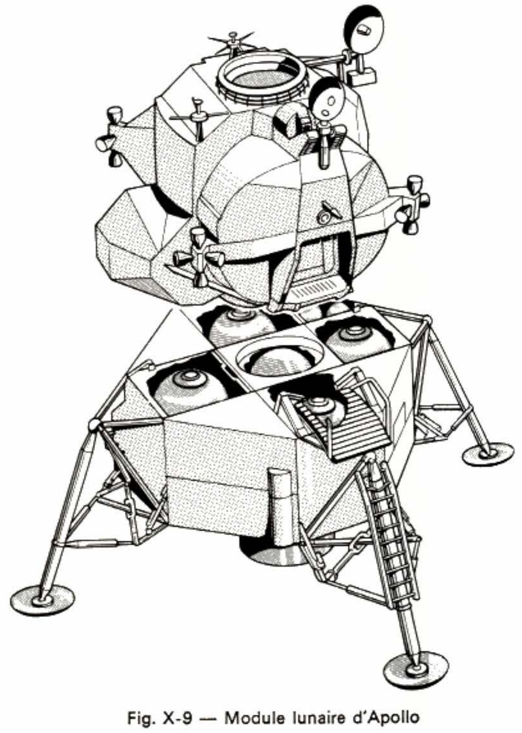


Fig. X-9 — Module lunaire d'Apollo

l'atterrissage sur la Lune, le module lunaire est muni de quatre jambes terminées par des pieds de surface relativement importante. Pour la structure de l'étage de descente on a essentiellement utilisé du béryllium. Cet étage reste abandonné sur le sol lunaire à la fin de la mission. L'étage de remontée est de conception relativement simple puisqu'il sert uniquement pour le retour des astronautes sur l'orbite d'attente où se trouve la cabine Apollo. Il consiste essentiellement en une cabine pressurisée offrant place à deux astronautes en station debout, et est équipé d'un moteur-fusée de 1700 daN de poussée. Le pilotage et la stabilisation sont réalisés au moyen de seize petits moteurs-fusées, de poussée variable, qui peuvent créer des couples autour des trois axes de l'engin.

9.3. Module de commande. — Le module de commande sert de cabine de pilotage et abrite les trois astronautes pendant toute la durée du voyage aller (jusqu'à l'orbite circumlunaire) et celle du voyage retour. C'est le seul élément qui revient sur la Terre. De forme conique, sa face bombée est recouverte d'un bouclier thermique pour la protection contre l'échauffement lors de la rentrée dans les basses couches de l'atmosphère, rentrée qui s'effectue à une vitesse d'environ 40 000 km/h. Le module de commande contient tous les équipements de télécommunications, de navigation et de guidage. Sa pointe avant est articulée et s'ouvre pour les manœuvres d'accostage et de rendez-vous avec le module lunaire, au retour de l'expédition sur la Lune. Sa hauteur est de 3,5 m pour un diamètre à la base de 4 m ; sa masse est de 5 t, ce qui conduit à une masse totale de 44 t pour l'ensemble du véhicule Apollo.

10. STATIONS ORBITALES ET NAVETTE SPATIALE

10.1. Les stations orbitales. — Si la conquête de la Lune, effectuée dans le cadre du programme Apollo, a constitué une étape importante de l'astronautique, il n'en reste pas moins vrai que, dans les années à venir, l'un des principaux pôles d'intérêt réside dans une utilisation de stations orbitales de grandes dimensions pour parvenir à une meilleure connaissance et une meilleure exploitation des ressources terrestres. Les États-Unis d'Amérique et l'U.R.S.S. étudient depuis longtemps des projets de stations orbitales, dont les premières sont apparues en mai 1973, alors qu'elles avaient été prévues pour 1974 (Skylab, fig. X-10, X-11 et X-12).

10.1.1. Conception des stations. — Le premier problème posé par la réalisation d'une station orbitale tient d'abord au choix de ses dimensions qui conditionne un certain nombre d'autres options. S'il est souhaitable que le volume offert aux cosmonautes soit le plus grand possible, encore faut-il que les lanceurs actuels puissent la mettre en orbite. Le plus puissant, Saturn V, permet de placer 135 t sur orbite. Cela sera suffisant pour les premières stations, et notamment le « workshop » américain. Dans l'avenir, cependant, les stations orbitales verront leurs dimensions s'accroître, et devront être assemblées sur orbite à partir d'éléments lancés individuellement. D'ores et déjà, les Soviétiques étudient pour 1975 une station constituée de trois modules fixés à 120° les uns des autres sur un élément central, ces modules pouvant être prolongés autant qu'on le désire par adjonction de nouveaux éléments.

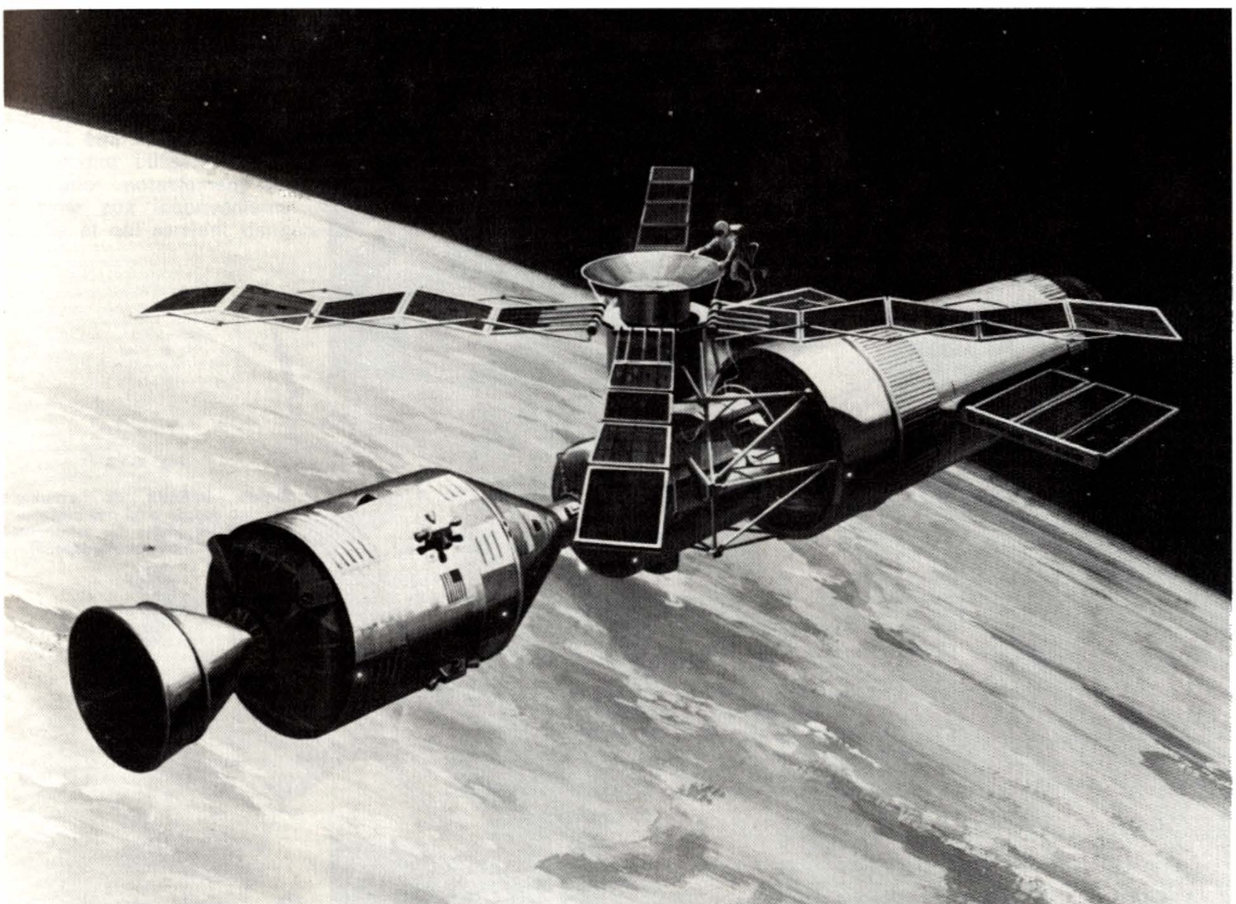


Fig. X-10 — Skylab, le « Laboratoire céleste » de la NASA, est une station spatiale expérimentale habitée qui décrit une trajectoire circulaire à 435 km au-dessus de la Terre. L'ensemble en orbite représente, en partant de la gauche : le véhicule spatial Apollo qui a assuré la liaison entre la Terre et l'espace ; le « multiple docking adapter » (adapteur d'amarrage polyvalent) qui a servi de centre de contrôle des expériences et de dock spatial ; le « Apollo telescope mount » (ensemble du télescope Apollo), observatoire solaire pour le premier programme à long terme d'étude du Soleil en dehors de l'atmosphère terrestre ; le « Airlock module » (module-sas étanche), sas vers l'espace pour les astronautes travaillant hors du satellite ; le « orbital workshop » (atelier orbital) qui comporte les quartiers de l'équipage et les installations consacrées aux expériences. La mission de Skylab a été l'étude de la Terre (écologie, océanographie, agriculture, forêts, géologie et géographie), du Soleil, de l'homme dans l'espace et de la technologie spatiale (*Rockwell International*)

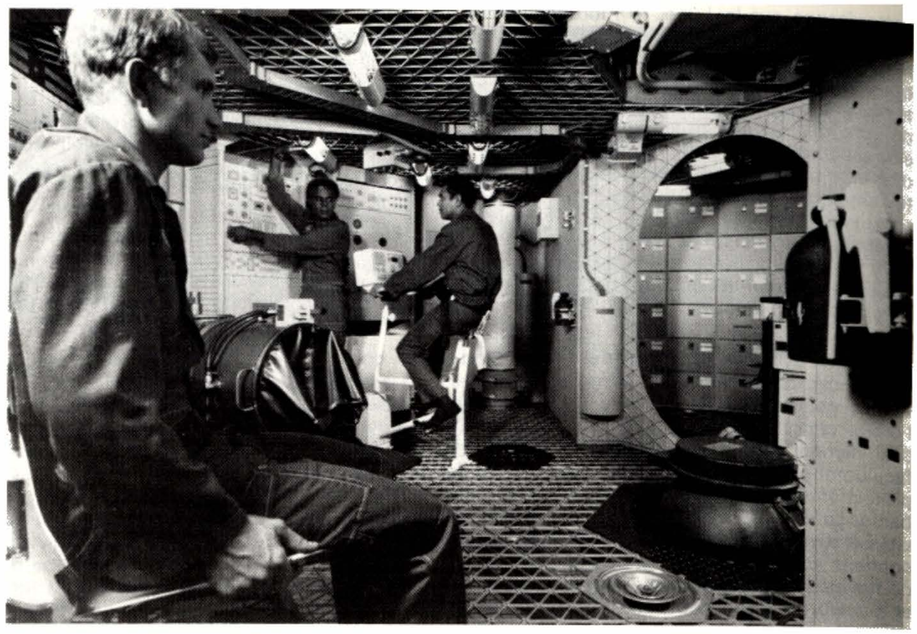


Fig. X-11

Skylab, des techniciens exécutent des manipulations dans le « workshop »
(*McDonnell Douglas Corporation*)

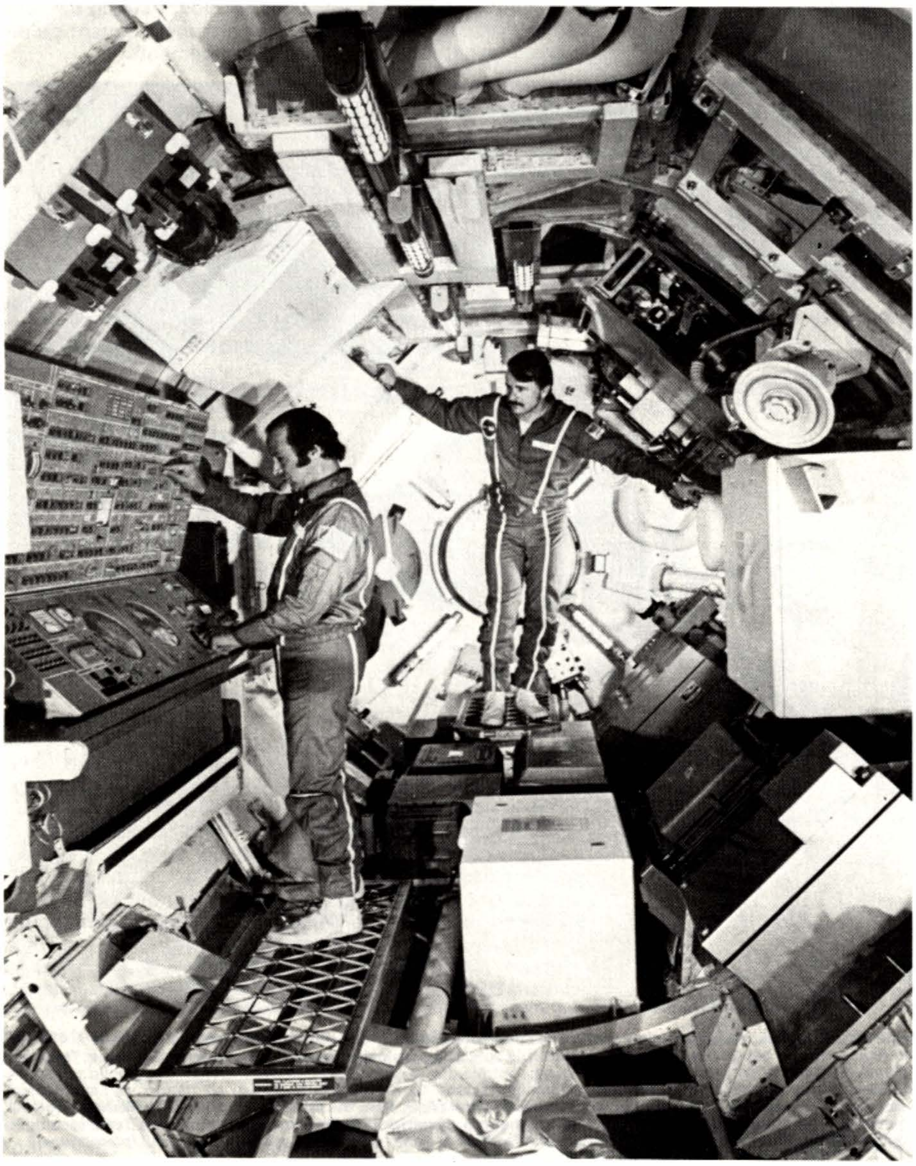


Fig. X-12

Skylab, intérieur du « multiple docking adapter » où des ingénieurs simulent les gestes des astronautes
(*Martin Marietta Aerospace*)

La conception de la station orbitale est intimement liée au problème de la création à bord d'une pesanteur artificielle. Si la nécessité en est reconnue, cette pesanteur ne pourra être obtenue raisonnablement que par une mise en rotation de la station, les parties habitées se trouvant le plus loin possible du centre de rotation. Une formule parfaitement adaptée est alors celle de la roue ; mais la formule soviétique de la station à rayons est également possible dans la mesure où les cosmonautes se trouvent relégués aux extrémités des rayons. À intensité de pesanteur égale, la vitesse de rotation nécessaire est d'autant plus faible que la cellule d'habitation se trouve plus éloignée du centre de rotation. Néanmoins, la rotation de l'ensemble de la station peut entraîner des complications, ne serait-ce que du point de vue de l'utilisation, et également pour la fourniture d'énergie, si celle-ci doit être assurée par des cellules solaires. C'est pourquoi il faudra attendre les premières expériences avec les premières stations qui n'offriront pas de pesanteur artificielle pour décider si cette dernière est véritablement indispensable. Les premiers résultats de l'utilisation de Skylab semblent indiquer que celle-ci pourrait ne pas être indispensable.

L'assemblage dans l'espace des différents éléments constituant la station ne sera pas non plus sans poser des problèmes, car il ne suffira pas d'obtenir un arrimage comme cela a déjà été fait à de nombreuses reprises lors de rendez-vous de satellites dans l'espace. La construction d'une station complète nécessitera le raccordement de centaines de câbles et tuyauteries. Pour procéder aux opérations de montage, les opérateurs devront disposer de véhicules individuels autopropulsés et de dispositifs d'accrochage sur les éléments à assembler.

10.1.2. Alimentation électrique des stations. — Comme pour les satellites artificiels, la première source d'énergie est l'énergie solaire. Toutefois, pour des stations de très grandes dimensions, nécessitant donc une puissance électrique importante, la solution la plus intéressante devrait être le générateur nucléaire du type SNAP 50, c'est-à-dire utilisant une pile nucléaire. La possibilité d'éloigner notablement la pile de la station permet d'obvier aux inconvénients des radiations émises par la pile et qui seraient dangereuses pour les astronautes.

10.1.3. Les stations en projet. — La première station orbitale opérationnelle aura été le Skylab américain, conçu dans le prolongement du programme Apollo en fonction des lanceurs existants. C'est une station monobloc lancée en une seule fois et constituée du dernier étage d'un lanceur Saturn 1B dont les réservoirs d'ergols non utilisés sont aménagés en cabine de travail et de repos. La charge utile est voisine de quatre-vingts tonnes ; cela a permis d'emporter un matériel relativement lourd. Le lancement du Skylab, prévu pour 1974, a été exécuté en mai 1973. Des équipes d'astronautes ont occupé cette station à plusieurs reprises bien que les panneaux solaires initialement prévus ne se soient pas déployés correctement.

10.2. La navette spatiale. — Le recours à des lanceurs spatiaux, tels que ceux décrits précédemment pour la mise en orbite de charges utiles, présente l'inconvénient de revenir cher, puisque les lanceurs ne peuvent servir qu'une seule fois. Aussi, dans l'optique d'un développement important des missions spatiales et de l'exploitation de stations orbitales permanentes, est-il apparu nécessaire de mettre au point un véhicule de transport réutilisable : *la navette spatiale* (fig. X-13).

Les études préalables de définition effectuées par la NASA furent basées sur la mise en orbite, à 180 km d'altitude, d'une charge utile de près de 30 t. Elles conduisirent à l'adoption d'un appareil composite comprenant un véhicule orbital associé à des éléments largables. Ce véhicule, de dimensions voisines de celles d'un DC-9, pèsera environ 68 t à vide ; il sera propulsé par trois moteurs à oxygène et hydrogène liquides développant une poussée unitaire de $170 . 10^3$ daN au niveau de la mer et de $213 . 10^3$ daN dans le vide, cette poussée pouvant en outre être réglée entre 50 et 100 % de son niveau théorique. Dans ce projet, les moteurs sont montés par l'intermédiaire d'un dispositif à la cardan autorisant un débattement de 11° de part et d'autre de leur axe, ce qui permet de piloter la navette en roulis, en tangage et en lacet pendant toute la phase propulsée. Compte tenu des faibles dimensions du véhicule orbital, les ergols sont emmagasinés dans un réservoir de 2 200 m³ de volume (1 600 m³ pour l'hydrogène liquide et 600 m³ pour l'oxygène liquide), qui est fixé sous le véhicule orbital. La

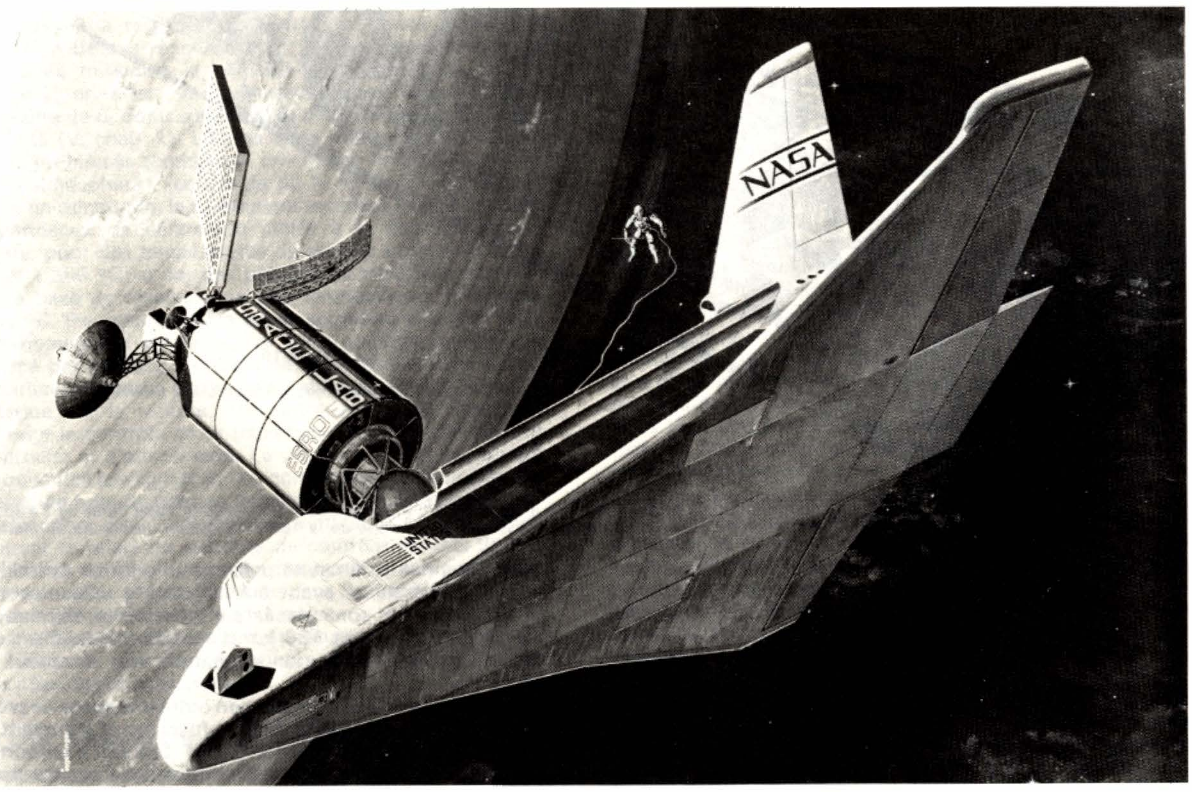


Fig. X-13 — Space Lab européen pour des expériences d'observation de la Terre, accouplé à la navette spatiale Orbiter (*Messerschmitt-Bölkow-Blohm G.m.b.H.*)

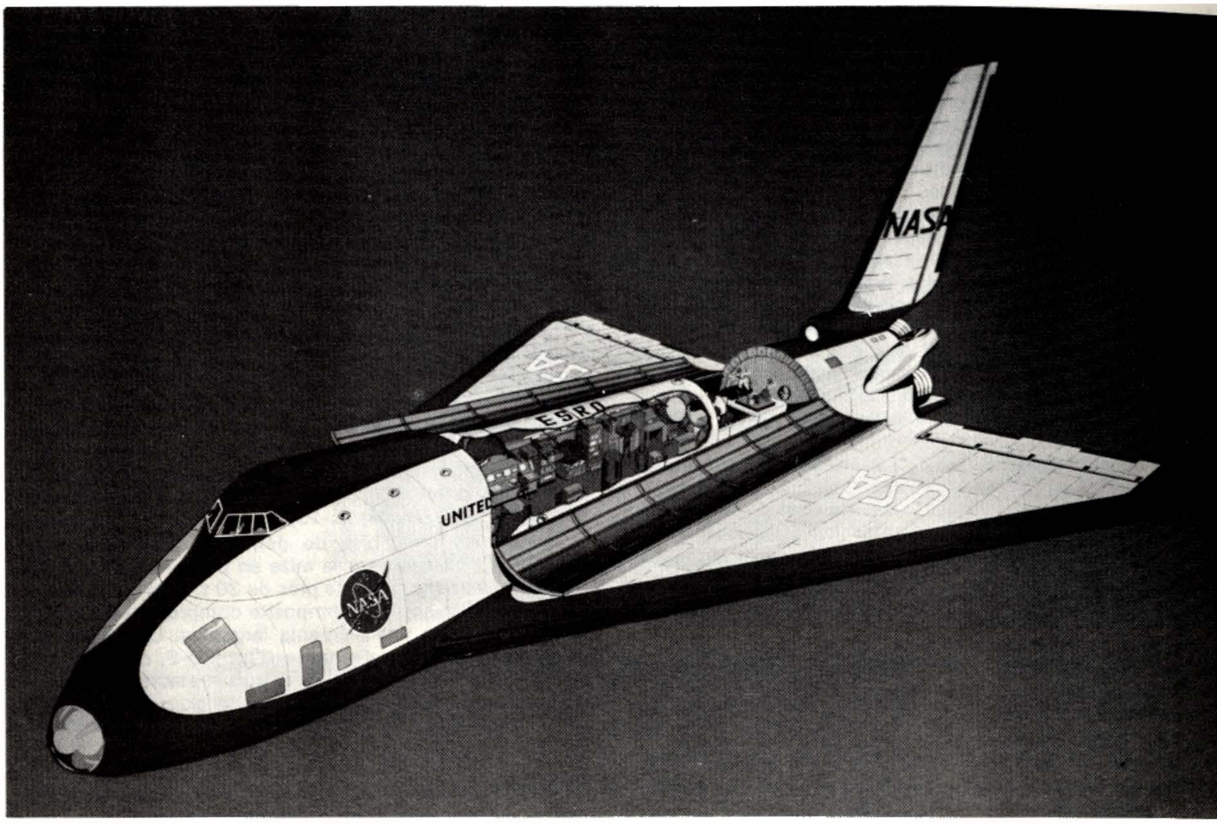


Fig. X-14

Ci-dessus : La navette spatiale Orbiter avec les portes de chargement ouvertes. À l'intérieur de la navette spatiale se trouve le laboratoire spatial mis en œuvre par l'ERNO (*ERNO*)

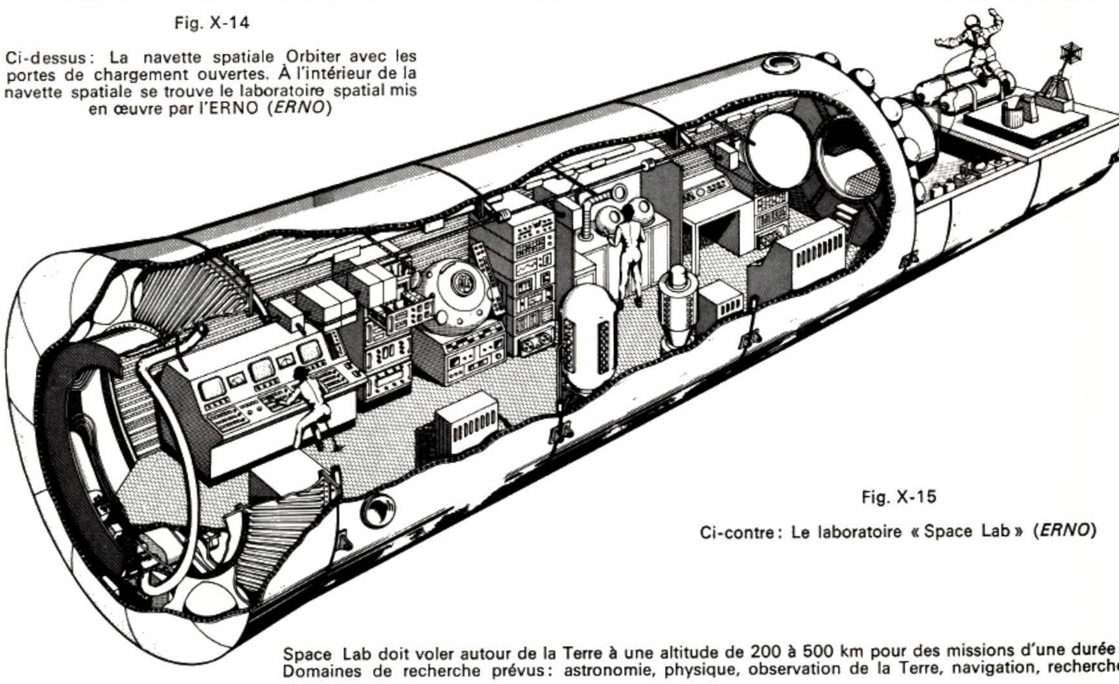


Fig. X-15

Ci-contre : Le laboratoire « Space Lab » (*ERNO*)

Space Lab doit voler autour de la Terre à une altitude de 200 à 500 km pour des missions d'une durée de 7 à 30 jours. Domaines de recherche prévus : astronomie, physique, observation de la Terre, navigation, recherche de matériaux

masse totale d'ergols emmagasinée atteint 778 tonnes. Pour le décollage, les moteurs du véhicule orbital sont assistés de deux accélérateurs à propergols solides de 3,96 m de diamètre développant chacun une poussée de 1 600 . 10³ daN ; la poussée totale au décollage est ainsi légèrement supérieure à 3 700 . 10³ daN. La combustion des accélérateurs se maintient pendant une durée de 30 s, au bout de laquelle ils sont largués et récupérés par parachutes. Lors du largage six petits moteurs-fusées assurent un écartement rapide de la navette. Chaque accélérateur est constitué de trois segments ; dans le segment avant, le bloc de poudre est perforé suivant une cavité en étoile, alors que dans les deux autres segments, la cavité présente une forme cylindrique.

Les accélérateurs ayant été largués, le véhicule orbital et son réservoir sont placés sur une orbite elliptique de 90 km de périgée et 180 km d'apogée, et c'est sur cette orbite qu'est opérée la séparation du réservoir non récupéré.

Le véhicule orbital comporte en outre une soute de près de 20 m de longueur située dans le fuselage et s'ouvrant à la partie supérieure (fig. X-14 et X-15). Elle sert à emporter la charge utile ; celle-ci pourra être constituée par dix passagers et une quantité importante de fret, ou encore par un étage complet de fusée.

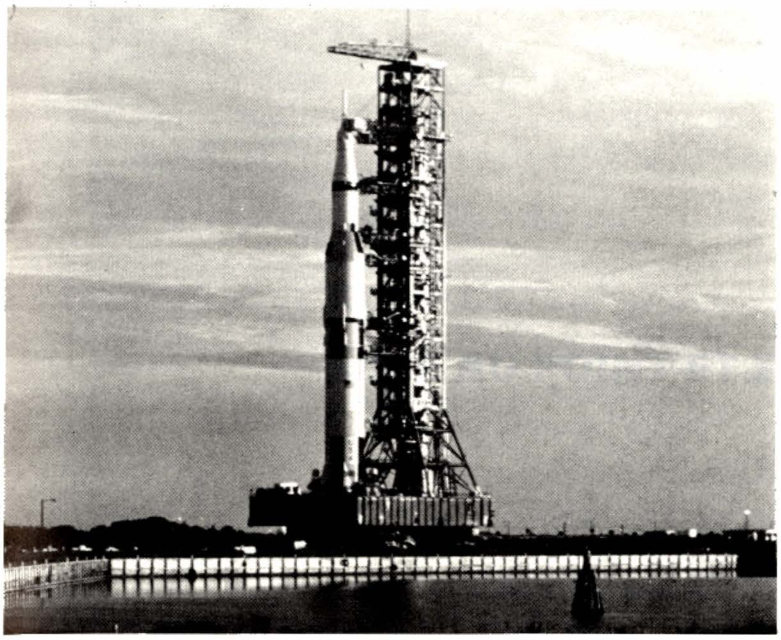


Fig. X-16
« Crawler »
(*Jacques Tiziou*)

Pour les manœuvres en orbite, le véhicule orbital dispose de deux propulseurs à hydrogène et à oxygène liquides de quelques centaines de décanewtons de poussée. Mais ce véhicule doit également revenir sur Terre et atterrir par ses propres moyens en choisissant son site d'atterrissage. Dans ce but, il est équipé de propulseurs aérobies qui sont, en fait, des turboréacteurs utilisant comme carburant de l'hydrogène liquide. Ces turboréacteurs, au nombre de deux, seront escamotés pendant la majeure partie de la mission, jusqu'à ce que la rentrée dans l'atmosphère ait été effectuée. La mise au point de ces réacteurs, qui devraient développer au total une poussée voisine de 15 000 daN, pose un certain nombre de problèmes liés à l'emploi de l'hydrogène liquide, notamment en ce qui concerne les matériaux et la régulation. Il faut néanmoins noter que l'utilisation de ces réacteurs n'est pas indispensable pour nombre de missions, le véhicule orbital pouvant atterrir par plané ; en effet, sa finesse aérodynamique maximale est voisine de 6, donc supérieure à celle des intercepteurs à aile delta (V. chap. 1). L'étude de la structure est dominée par les problèmes thermiques rencontrés lors de la rentrée dans l'atmosphère ; l'ensemble de la structure interne est réalisé en duralumin, le revêtement extérieur étant constitué de panneaux de céramique collés à la structure sous-jacente, pour des températures de surface comprises entre 350 et 1 300 °C, et par des plaques de matériaux composites à base de résines pour des températures inférieures à 350 °C. De plus, dans les zones soumises à de très forts échauffements, il est fait appel à du graphite pyrolytique renforcé par un tissu de fibres de graphite ; tel sera le cas, en particulier, de la partie avant du fuselage et du bord d'attaque de la voilure. Un autre problème important concerne le contrôle de la trajectoire au cours des phases d'approche et d'atterrissage. Le véhicule orbital est équipé de gouvernes aérodynamiques, constituées de deux élevons au bord de fuite de chaque demi-voilure et d'un gouvernail de direction sur l'empennage vertical. Ces gouvernes prennent le relais du système de contrôle par jets de gaz en dessous de Mach 2 ; ce dernier système sert également pour le contrôle précis d'attitude dans l'espace, notamment lors des manœuvres de rendez-vous.

Les différents systèmes ont été étudiés afin qu'il n'y ait pas besoin de plus de quinze jours d'immobilisation entre deux missions successives.

11. LES BASES DE LANCEMENT

Le lancement des engins nécessite des installations assez complexes, en dehors même des moyens de guidage déjà décrits. Ces installations sont cependant assez différentes selon qu'il s'agit de lanceurs spatiaux ou de missiles balistiques.

Les lanceurs spatiaux, dès qu'ils atteignent une vingtaine de mètres de hauteur, doivent être transportés par étages séparés, ce qui entraîne la nécessité de disposer d'installations d'assemblage au voisinage immédiat du site de lancement.

11.1. Lancement de Saturn V. — À titre d'exemple, nous décrirons la base de lancement des Saturn V au cap Kennedy. Celle-ci comporte trois sous-ensembles principaux :

— le hall d'assemblage à la verticale,

— le « *crawler* », chariot transporteur de l'engin assemblé (fig. X-16),

— la tour ombilicale de lancement.

Le hall d'assemblage, haut de 158 m et long de 213 m, permet d'assembler simultanément quatre Saturn V. Pour pouvoir sortir les fusées, il a fallu prévoir des portes de 138 m de hauteur. L'intérieur du hall est évidemment équipé d'engins de levage (grues et ponts roulants) dont les plus puissants ont une capacité de 250 tonnes.

Le hall étant distant du « pas de tir » de quelques kilomètres, il a fallu imaginer un véhicule de transport sur lequel les lanceurs sont assemblés, et qui les conduit à leur destination finale. Ce véhicule se compose d'une plateforme (40 m × 35 m) montée sur quatre ensembles à chenilles ; avec sa charge, c'est-à-dire le lanceur dans sa tour d'assemblage, il pèse 9 000 t. La propulsion, électrique, est assurée par seize moteurs entraînés par quatre générateurs de 1 000 kW de puissance unitaire. La vitesse maximale de déplacement est de 3 km/h. Pour le transport du lanceur et de sa tour, cette vitesse est réduite à 1,5 km/h.

La tour ombilicale constitue la partie la plus importante de l'ensemble. Elle permet tout à la fois, d'assembler, d'essayer et de lancer l'engin. Sa hauteur est de 140 m. Le long de cette tour se trouvent répartis une vingtaine de niveaux de travail. Compte tenu de l'énergie acoustique élevée engendrée lors de la mise à feu du premier étage, la structure de la tour doit être protégée et ses parois sont recouvertes d'une substance isolante fibreuse.

11.2. Lancement de missiles balistiques. — Les missiles balistiques sol-sol sont tirés de silos enterrés dans le sol, la mise à feu étant commandée à partir d'un poste central également enterré. L'armée de l'Air française contrôle une telle installation sur le plateau d'Apt en Haute-Provence.

MISE AU POINT ET ESSAIS

CHAPITRE XI

ESSAIS AU SOL

1. IMPORTANCE DES ESSAIS. SIMULATION

Les essais d'aérodynes — l'aérodyne étant, selon la définition de la Fédération aéronautique internationale, organe suprême des homologations de performances, toute machine susceptible de se déplacer dans les airs — ont pris un caractère officiel dès les débuts de la navigation aérienne. Un souci de sécurité publique inspirait ces mesures car si les pionniers, malgré leur audace, effectuaient préalablement à leurs vols des expériences souvent scientifiques, leurs émules, des amateurs le plus souvent, négligeaient les précautions essentielles. À l'origine les essais de caractère privé relevaient de l'artisanat. Peu à peu, ils se sont perfectionnés et ont été le complément indispensable de toute navigation.

L'essai au sol consiste à étudier le comportement des éléments composant l'appareil (le long-courrier américain Boeing 747 comporte 4,5 millions de pièces, boulons inclus). Chaque type de pièce doit subir les vérifications de résistance notamment à la rupture, aux conditions thermiques et à l'usure. À son premier décollage, un prototype ne saurait avoir une seule pièce dont la définition n'ait pas été reconnue convenable et la réalisation conforme aux prévisions. En outre, l'appareil, sous forme de maquette et des parties d'appareils sont soumis à diverses épreuves pour simuler toutes les contraintes d'environnement qui seront appliquées en service.

Il faut donc distinguer les essais aérodynamiques de la cellule, les essais de résistance des matériaux — lorsqu'il s'agit de matériaux déjà non homologués —, des structures, des équipements, des propulseurs. Le Boeing 747 a nécessité 12 000 heures d'essais en soufflerie. Technique déjà ancienne, à laquelle le nom de Gustave Eiffel restera attaché, l'étude des réactions (efforts et moments) que subit une maquette de l'aérodyne placée sous différentes attitudes dans une masse d'air en mouvement (V. chap. 1) apporte des données sans lesquelles aucun prototype ne saurait être réalisé.

Des machines de traction et de vibration permettent d'effectuer des essais de résistance et de fatigue sous des contraintes variées. Des radiers d'essais statiques et des cuves d'essais de fatigue autorisent l'observation du comportement de cellules entières ou de tronçons très importants. Les essais de contrainte thermique du Concorde ont comporté l'échauffement rapide d'un appareil entier, par chauffage infrarouge à partir d'une installation de 30 000 kW, suivi d'une phase de refroidissement par circulation d'air dans lequel a été vaporisé de l'azote liquide. Les trains d'atterrissage sont testés en essais dynamiques sur des installations simulant des efforts à l'impact atteignant 1 250 000 N sur surface fixe ou mobile en translation; les roues, les freins et les pneumatiques sont essayés sur des machines permettant d'exercer des efforts de 350 000 N. Des canons d'essais aux impacts permettent de contrôler la tenue des cellules et verrières au choc accidentel avec des oiseaux.

Les centres d'essais aéronautiques au sol, notamment celui de Toulouse, effectuent des tests de fonctionnement simulé sur les équipements des avions, matériels de conditionnement d'air, organes de génération hydraulique, matériels hydrauliques.

Les propulseurs sont essayés au sol dans des conditions de vol simulé sur prototype, parfois sur banc volant.

Aux essais au sol du matériel il faut ajouter celui du personnel, non moins important. Sans doute cette catégorie d'essais n'intervient-elle qu'à la sortie du prototype mais, comme tout essai, ils sont susceptibles de provoquer des modifications de l'appareil lui-même, comme nous le verrons ensuite.

Un appareil est le produit de bureaux d'études, de centres d'essais au sol et en vol, soit d'une équipe à laquelle vient s'adjoindre l'autorité officielle. De cette collaboration naît l'avion ou l'hélicoptère de série. La simulation des conditions de fonctionnement constitue une technique de préparation à la conduite des appareils de navigation ou de toute autre machine. Relativement récente, elle s'applique à des branches de l'industrie de plus en plus nombreuses. Elle est utilisée, en dehors de l'aviation et de la giraviation, pour les sous-marins, les chars d'assaut, les navires marchands et les pétroliers, les voitures automobiles, les véhicules de transports en commun de surface, les chemins de fer et, depuis peu, pour les machines-outils.

Le coût élevé des cellules, des appareils de propulsion, des équipements demeure la première raison de cette orientation. La seconde réside dans le risque couru par le personnel et les tiers. De plus, l'expérimentation en vol peut s'avérer malaisée voire impossible. Par ailleurs, elle permet, en un temps réduit, d'envisager de multiples applications.

La navigation aérienne demeure un domaine privilégié de la simulation. Tant entreprises que services et constructeurs y recourent. Malgré les dépenses très élevées qu'entraînent l'acquisition d'un simulateur, son entretien, son utilisation et malgré la brièveté de sa vie opérationnelle (en raison des changements de types d'appareils), il est devenu l'auxiliaire indispensable de la vie aéronau-

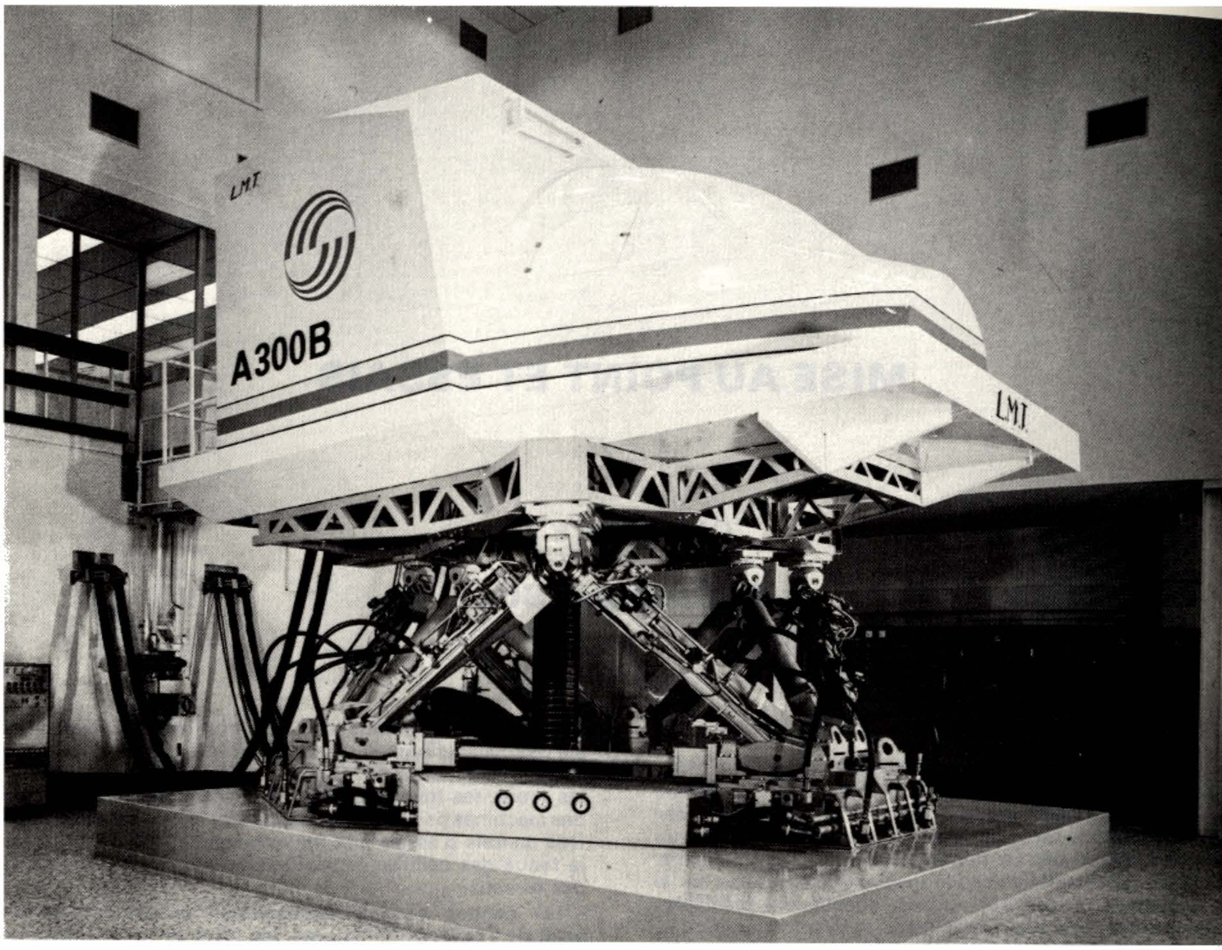


Fig. XI-1 — Simulateur d'Airbus (*L.M.T.*)

tique. Le simulateur de vol est essentiellement la reproduction d'une cabine de pilotage. Il comporte des commandes, des instruments, un appareillage et un matériel d'aspect et d'emplacement identiques à ceux du type d'appareil simulé. Les manipulations effectuées par l'élève sont automatiquement transmises hors de la cabine pour être observées et corrigées par l'instructeur. Le simulateur présente, en effet, la particularité d'être aveugle, c'est-à-dire de ne permettre aucune vue sur le local qui l'abrite afin de réaliser les conditions de pilotage sans visibilité extérieure. Le travail s'effectue soit selon un plan pré-établi, soit à la discrétion de l'instructeur qui communique par phonie.

Les exigences de la navigation aérienne, en particulier de sa sécurité, et de l'économie aéronautique ont apporté des perfectionnements, d'abord en matière de visualisation. À la place de la vitre avant sont projetées des vues fixes ou un film représentant des situations de vol. Le déplacement de l'image dans les trois dimensions correspond au mouvement de l'appareil. Certains simulateurs perfectionnés comportent un système de visualisation en couleurs avec circuit de télévision fermé. Un modèle à trois dimensions, à grande échelle et minutieusement détaillé, d'un aéroport et du terrain avoisinant, ainsi que des dispositifs associés d'éclairage et de caméra, forment un système complet qui est relié au calculateur afin de fournir au pilote une illusion totale de réalité. Puis on a rendu mobile le simulateur lui-même qui obéit alors à certains déplacements commandés (par le pilote, l'instructeur) ou programmés. Cette fonction de manège atteint actuellement un stade appréciable. Le châssis de l'enveloppe du simulateur fixé sur un axe très résistant, parfois à près de dix mètres au-dessus du sol (fig. XI-1), peut être sollicité suivant différents angles, de plusieurs degrés, donnant à l'occupant du simulateur l'illusion de naviguer réellement puisqu'il en ressent certains effets.

Toutefois l'adjonction la plus importante et la plus immédiatement optimale aura été celle de l'ordinateur. Le simulateur L.M.T. de l'avion Transall C 160, constitue un exemple. Cet avion de transport de troupes doit faire face à des problèmes classiques de transport mais aussi à des missions opérationnelles de type militaire, telles que parachutage de charges et navigation à basse altitude. Son simulateur, réalisé suivant la technique numérique, utilise un ordinateur équipé d'une mémoire de 32 000 mots de 24 chiffres binaires. Le poste de l'instructeur possède deux traceurs de route, le contrôle des manipulations de toutes les commandes et permet, en outre, l'affichage de plus de 400 incidents de vol.

L'application du simulateur aux voilures tournantes répond à un critère de rentabilité car l'hélicoptère, qui est d'une utilité irremplaçable, doit sa sécurité exceptionnelle à des révisions constantes. Pour une heure de vol, il y a une heure de maintenance. En conséquence, le pilotage doit en être le plus humainement parfait possible. Cependant, les bases d'entraînement et de perfectionnement sont dispersées, celles de la Protection civile et de l'Armée en particulier. Il a donc fallu imaginer un simulateur tracté. Pour le SA 330 des simulateurs complets ont été installés en semi-remorque climatisée comportant la simulation du vol, des moteurs, des aides à la navigation, des servitudes et des pannes qui peuvent les affecter. L'ensemble est complété par une visualisation à haute définition par télévision. Cette caractéristique permet l'entraînement aux phases particulièrement critiques du décollage, du vol stationnaire et de l'atterrissage de l'hélicoptère.

Autre application : le simulateur d'études polyvalent qui permet aux expérimentateurs officiels d'étudier les données des problèmes qu'ils rencontreront en vol et de limiter les risques. Par changement de programmation et d'éléments

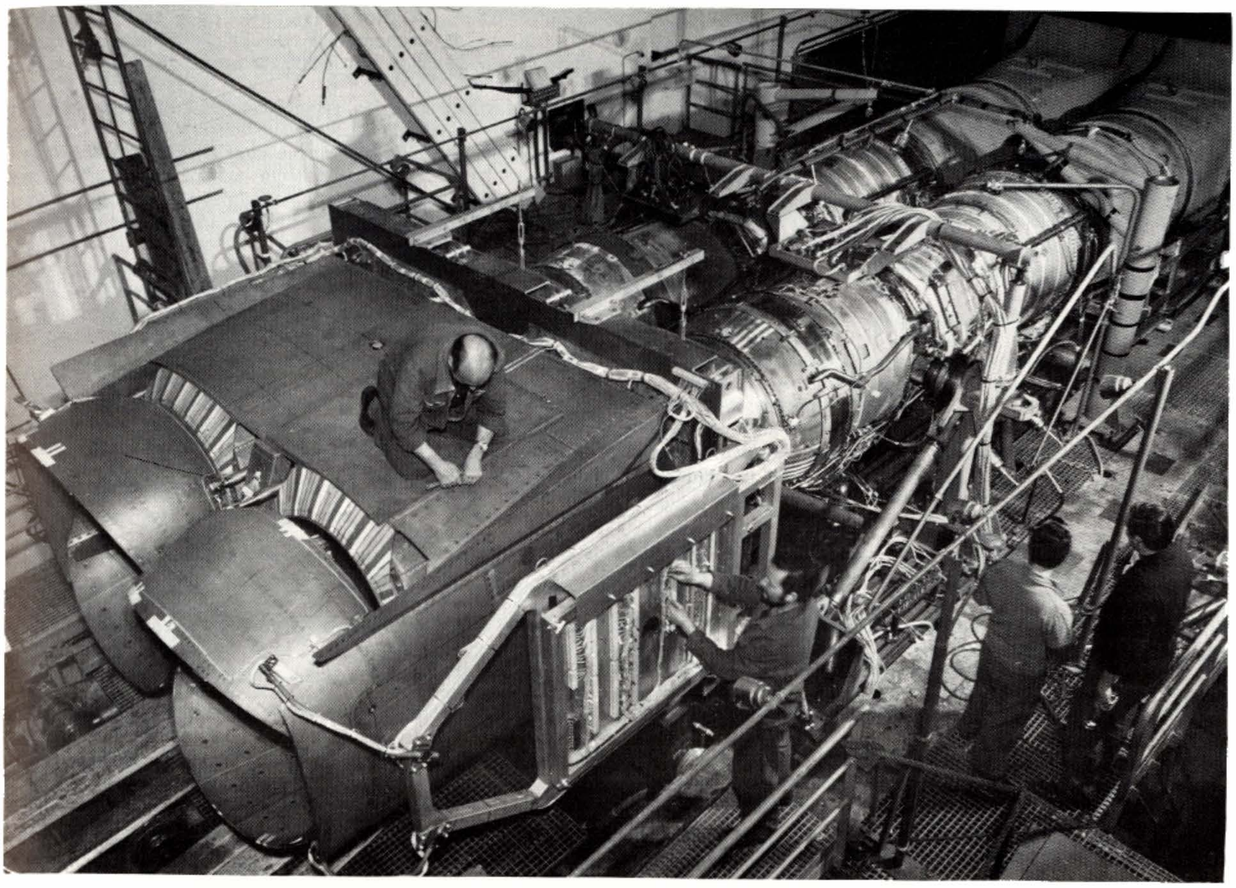


Fig. XI-2

Essais au banc de l'ensemble propulsif de Concorde, « Olympus 593 » équipé de la tuyère 28 (*S.N.E.C.M.A.*)

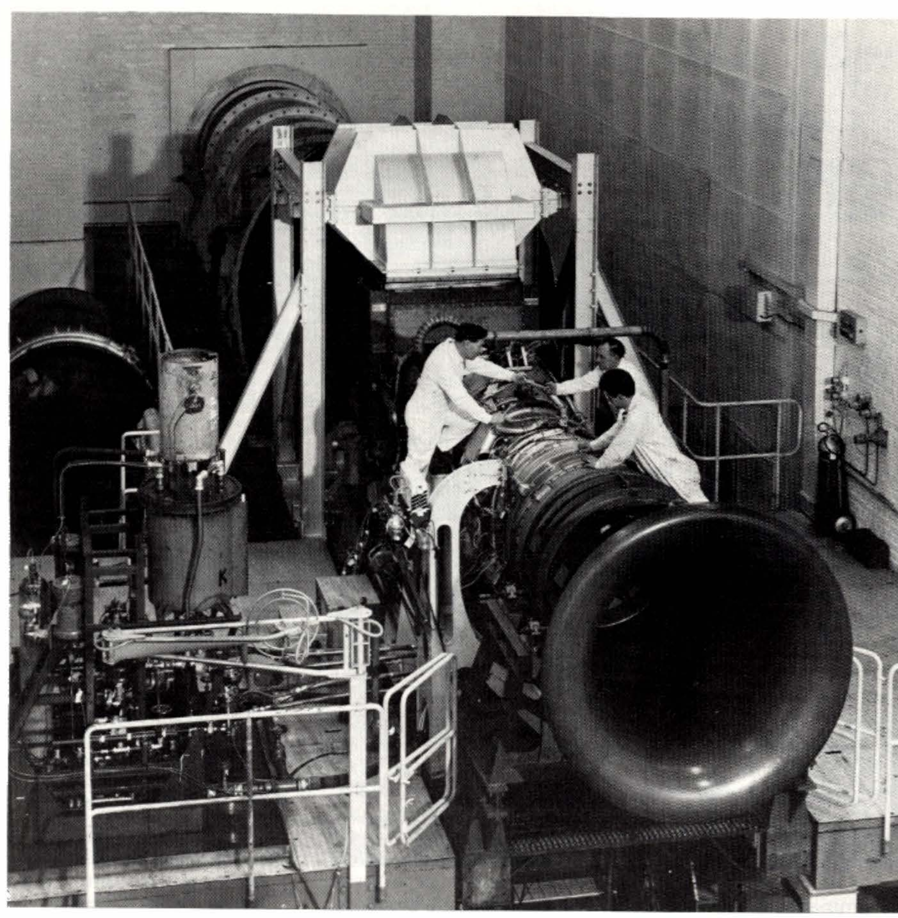


Fig. XI-3

Moteur « Olympus 593 » équipé de l'ensemble d'éjection complet de la S.N.E.C.M.A. sur un banc d'essai au Centre de Bristol Siddeley (*Bristol Siddeley*)

périphériques, il est possible de passer de la simulation d'un chasseur supersonique, à celle d'un transport subsonique ou même à celle d'un hélicoptère.

2. LES ESSAIS DE TURBORÉACTEURS

La mise au point d'un moteur d'avion a toujours nécessité des essais très complets. Les turboréacteurs modernes ne font pas exception à la règle, bien au contraire, les essais étant même d'autant plus variés que les conditions d'emploi sont plus étendues. Ces essais peuvent se décomposer en deux groupes : les essais au banc et les essais en vol.

2.1. Les essais au banc (V. fig. XI-2 et XI-3). — Ils se déroulent dans des salles de grandes dimensions munies d'une entrée d'air et d'un conduit d'échappement. Les essais de base s'effectuent dans les conditions de température et de pression régnant au sol ; ils permettent de définir les performances au point fixe du réacteur. Ils sont complétés par des essais de fonctionnement dans les conditions de vol simulé ; le réacteur est alors placé dans un caisson dans lequel on crée artificiellement les conditions d'ambiance correspondant au vol réel.

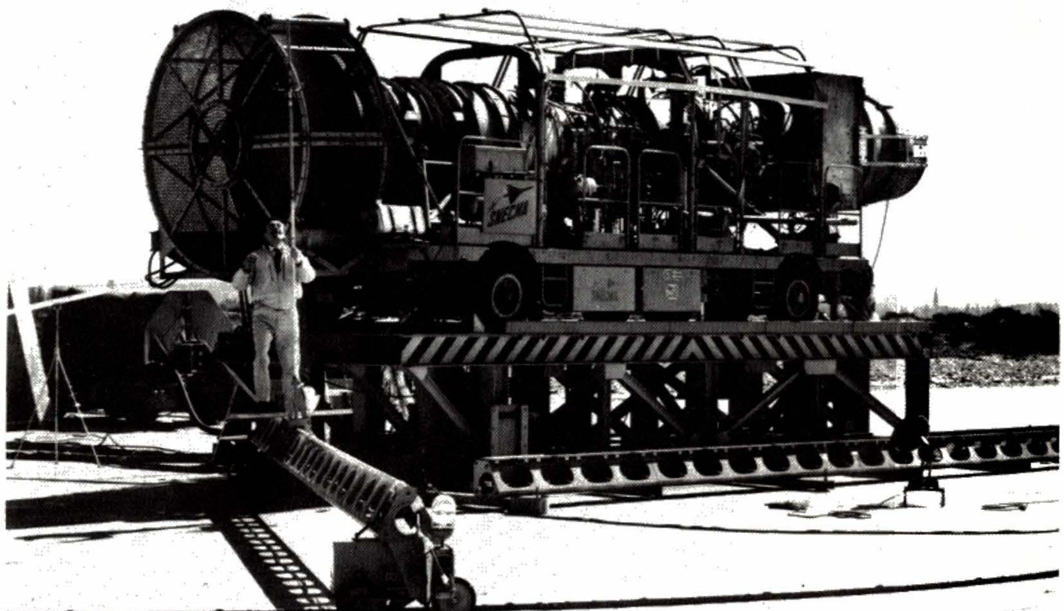
compresseurs. À titre d'exemple, pour une altitude de 11 000 m, la compression de l'air d'admission devient nécessaire dès que l'on dépasse un nombre de Mach de 1,63.

De la même manière, les conditions à l'échappement du moteur doivent représenter les conditions ambiantes du vol, c'est-à-dire que la pression en aval du caisson doit être la pression statique P_z à l'altitude de vol considérée ; cette pression étant toujours nettement inférieure à la pression au sol, pour éjecter les gaz brûlés il est nécessaire de les recomprimer et ce dans un rapport supérieur à 5 pour une altitude de 11 000 m. De plus, les gaz brûlés étant à une température élevée, il faut d'abord les refroidir avant de pouvoir les transporter dans les canalisations ; ce refroidissement est obtenu soit par injection d'eau dans les gaz, soit par contact avec un réfrigérant.

On voit donc que les installations d'essais en « vol simulé » sont très complexes et nécessitent des appareillages importants, la puissance installée nécessaire étant de plusieurs dizaines de mégawatts. Aux compresseurs, groupes de refroidissement, réchauffeurs, dispositifs d'injection d'eau déjà cités, il faut encore ajouter des moyens énergétiques, une station de pompage, des moyens d'alimentation en carburant, un ensemble de régulation et de contrôle. Le Centre d'essais des propulseurs (C.E.P.) de Saclay dispose d'installations de ce type permettant de simuler les conditions de vol jusqu'à Mach 4 et jusqu'à une altitude de 35 000 m. Tous ces essais ont pour but de déterminer les principaux paramètres de fonctionnement du moteur. La mesure la plus importante est celle de la poussée, qui peut s'effectuer à l'aide d'une balance constituée essentiellement d'un dynamomètre. De plus, il faut mesurer des pressions dont certaines peuvent être rapidement variables, des températures, des vitesses de rotation. Toutes ces grandeurs physiques sont détectées par des capteurs et transformées en signaux électriques qui sont transmis aux enregistreurs situés à distance. En dehors des essais sur moteurs complets, il faut encore mentionner les essais de sous-ensembles tels que compresseurs, turbines et chambres de combustion, essais qui sont réalisés dans des installations spéciales.

De plus, les nouvelles recherches pour la réduction du bruit ont nécessité la mise en œuvre d'installations d'essais particulières. Certaines d'entre elles sont consacrées à des

Fig. XI-4

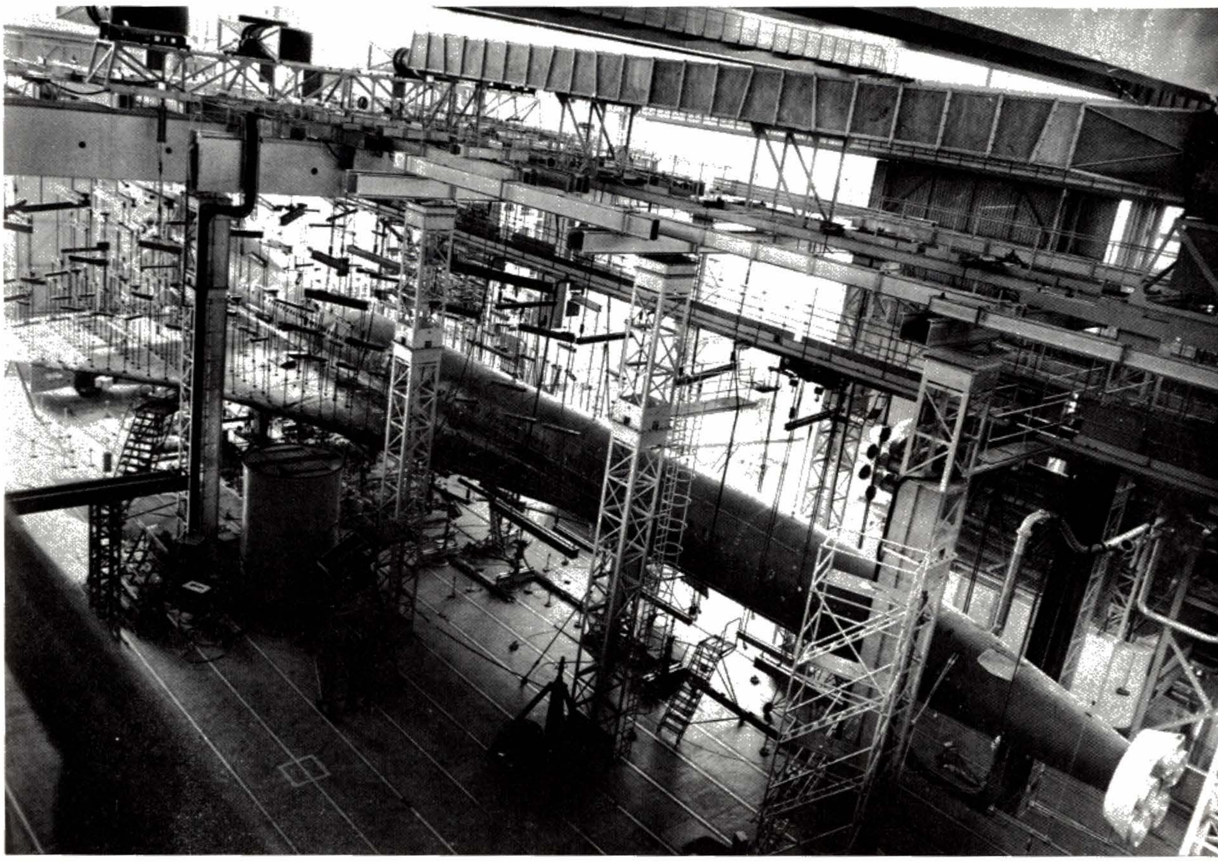


En vol, les paramètres physiques de l'air aspiré par le réacteur correspondent aux conditions d'arrêt (pression : P_i, température T_i) ; si l'on appelle M le nombre de Mach de vol, P_z la pression et T_z la température ambiante à l'altitude considérée, P_i et T_i sont définis par les relations suivantes :

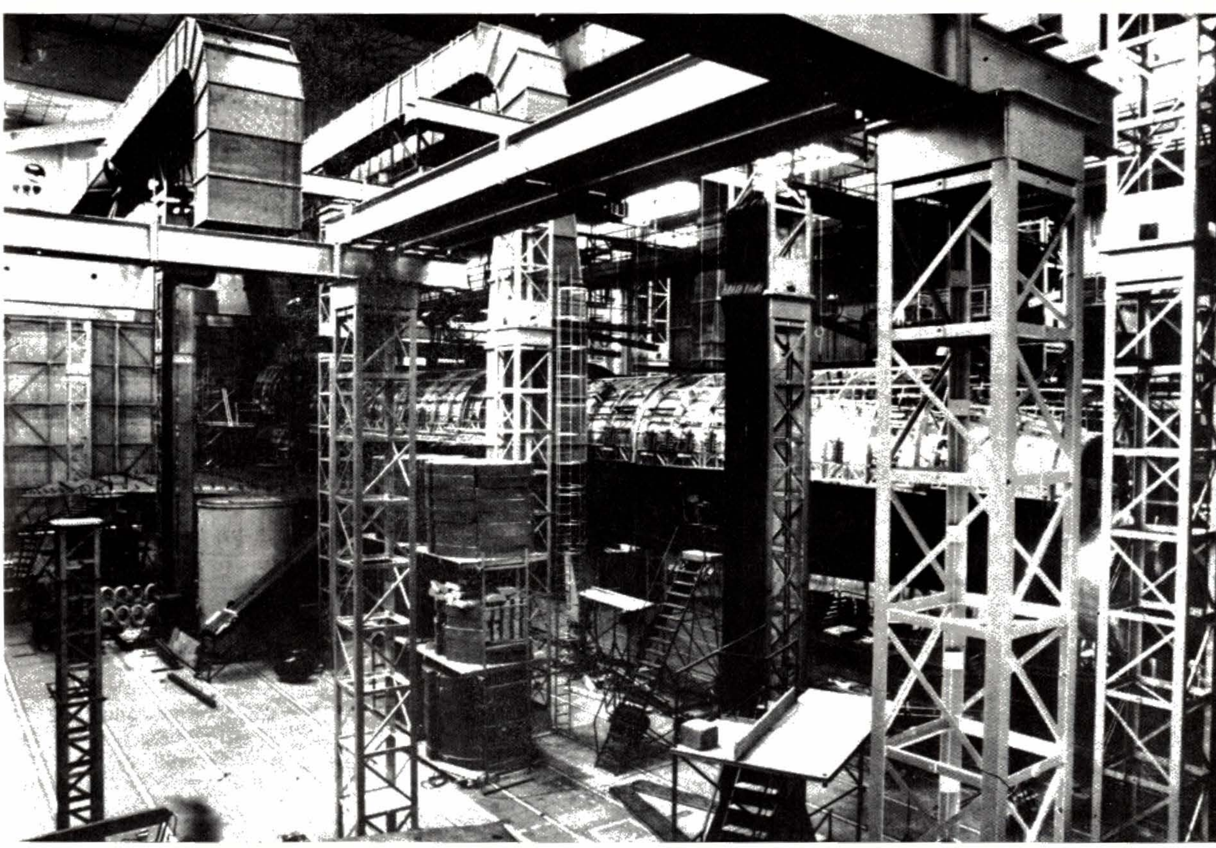
$$P_i = P_z\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$$T_i = T_z\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)$$

L'alimentation du caisson doit donc se faire en air dont la pression et la température sont respectivement P_i et T_i. Les avions modernes volant généralement au-dessus de 10 000 mètres, la température T_z est égale à 216,5 K ; la température T_i croît avec le nombre de Mach et atteint 390 K à Mach 2. Il est donc nécessaire de préchauffer l'air d'admission. En ce qui concerne la pression il faut tenir compte à la fois de l'altitude et du nombre de Mach ; selon les cas de vol, on peut être amené soit à diminuer la pression ambiante, soit à l'augmenter, ce qui nécessite alors des



Montage pour application des efforts sur la voilure (*Air et Cosmos*)



Complément de montage (en cours d'installation) pour étude des contraintes thermiques (*Air et Cosmos*)

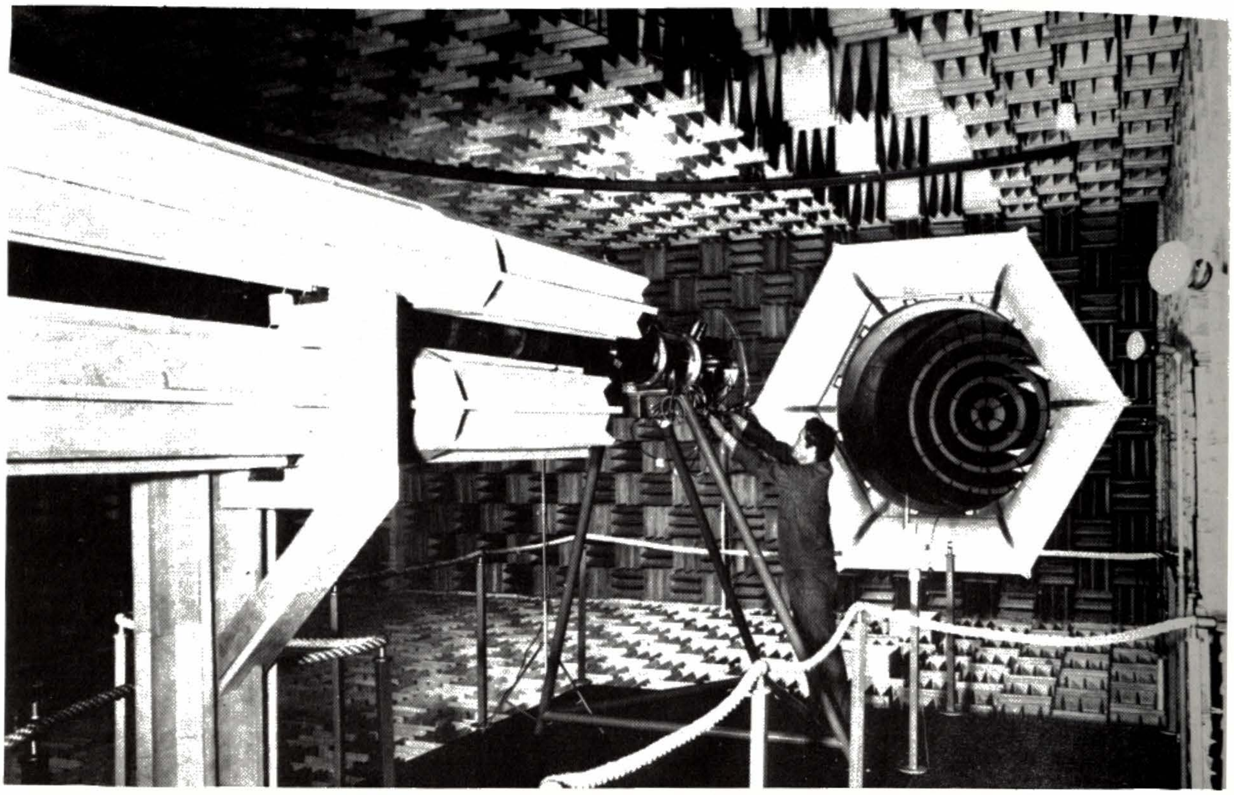


Fig. XI-5

sous-ensembles seuls. Les essais des moteurs complets peuvent se faire soit à l'air libre, soit en chambre sourde. La première méthode a notamment été utilisée par la S.N.E.C.M.A. à Istres pour les essais de bruit des réacteurs Olympus de Concorde (V. fig. XI-4). Les mesures sont effectuées à l'aide de microphones que l'on déplace le long d'un rail circulaire entourant le moteur à une distance de soixante mètres. La seconde méthode est développée au C.E.P. de Saclay. La chambre sourde constituée d'une pièce flottante à l'intérieur d'un local en béton, est revêtue sur ses parois internes de matériaux absorbants qui la rendent anéchoïde à un décibel près. Cette installation a surtout été utilisée pour l'étude des bruits de jet (fig. XI-5).

2.2. Les essais en vol. — Même avec les bancs de simulation des conditions de vol, il n'est pas possible de connaître tous les paramètres intéressant le fonctionnement d'un turboréacteur dans toutes les conditions de vol et, notamment, les interactions avec la structure de l'avion. Pour compléter les essais au sol il est donc nécessaire de prévoir des essais en vol. Ceux-ci sont réalisés sur des avions éprouvés et équipés spécialement de tous les dispositifs de mesure nécessaires. C'est ainsi que, toujours dans le cadre du développement du programme Concorde, les turboréacteurs Olympus ont été essayé sur un bombardier Avro « Vulcan », le moteur en essai étant placé sous le fuselage dans une nacelle identique à celle adoptée pour Concorde et comportant notamment une entrée d'air à géométrie variable (fig. XI-6). De plus, dans certains cas, le moteur en essai remplace directement l'un des moteurs de l'avion banc d'essai, ce qui évite le montage d'un propulseur supplémentaire ; mais cela n'est possible que lorsque l'avion considéré comporte des moteurs en nacelles.

3. ESSAIS DE STRUCTURES

3.1. Généralités. — Outre les essais classiques sur des échantillons des matériaux utilisés dans la construction d'un aéronef afin de définir ou de préciser les caractéristiques mécaniques (limite élastique, limite de rupture, allongement, module d'élasticité, fluage, etc.) et chimiques (résistance à la corrosion) en tenant compte du comportement à l'échauffement, il est effectué des essais statiques sur une reproduction de la cellule et généralement des essais destinés à définir la tenue aux vibrations.

Les essais statiques consistent à reproduire et à appliquer à l'aide de vérins les efforts préalablement calculés par les bureaux d'études et précisés à la suite des essais en soufflerie. Ces essais sont, le plus souvent, progressivement poursuivis jusqu'à rupture d'éléments.

Une autre catégorie d'essais, généralement exécutés, consiste à soumettre l'éprouvette à des vibrations préalablement déterminées par la méthode conçue et mise au point par l'O.N.E.R.A., afin de déterminer les vitesses critiques auxquelles l'aéronef ne pourrait résister.

Tous ces essais sont effectués en fonction des contraintes prévues dans les différents cas de vol et demandent des installations importantes.

3.2. Cas particulier du Concorde. — L'effet des évolutions lentes ou des variations importantes de température n'a pas été évoqué ci-dessus. Or, dans le cas de l'avion Concorde, ces effets peuvent prendre une importance considérable du fait qu'au cours du vol de croisière l'échauffement cinétique dû à la vitesse de vol ($M = 2$) en altitude, augmente la température de certains éléments de plus de 100 °C et, ce, pendant plus de trois heures. L'apport thermique dû à l'échauffement cinétique est principalement concentré vers l'avant du fuselage et les bords d'attaque des ailes ; l'augmentation de température des surfaces externes de l'appareil est donc très variable, et, comme l'intérieur du fuselage (très long) est climatisé (maintien d'une pression et d'une température sensiblement constantes dans tout l'intérieur du fuselage) les échanges par convection ont des valeurs très différentes. De plus, comme la structure du fuselage n'est pas, et ne peut pas être, homogène (tôles d'épaisseurs différentes, liaisons avec certaines pièces plus ou moins massives) l'échauffement des diverses pièces n'est identique ni en importance, ni en progressivité. Les températures des matériaux varient d'un point à un autre sous l'effet conjugué des différentes valeurs locales de la convection et de la conductibilité, et leurs écarts développent des tensions internes. Cela est

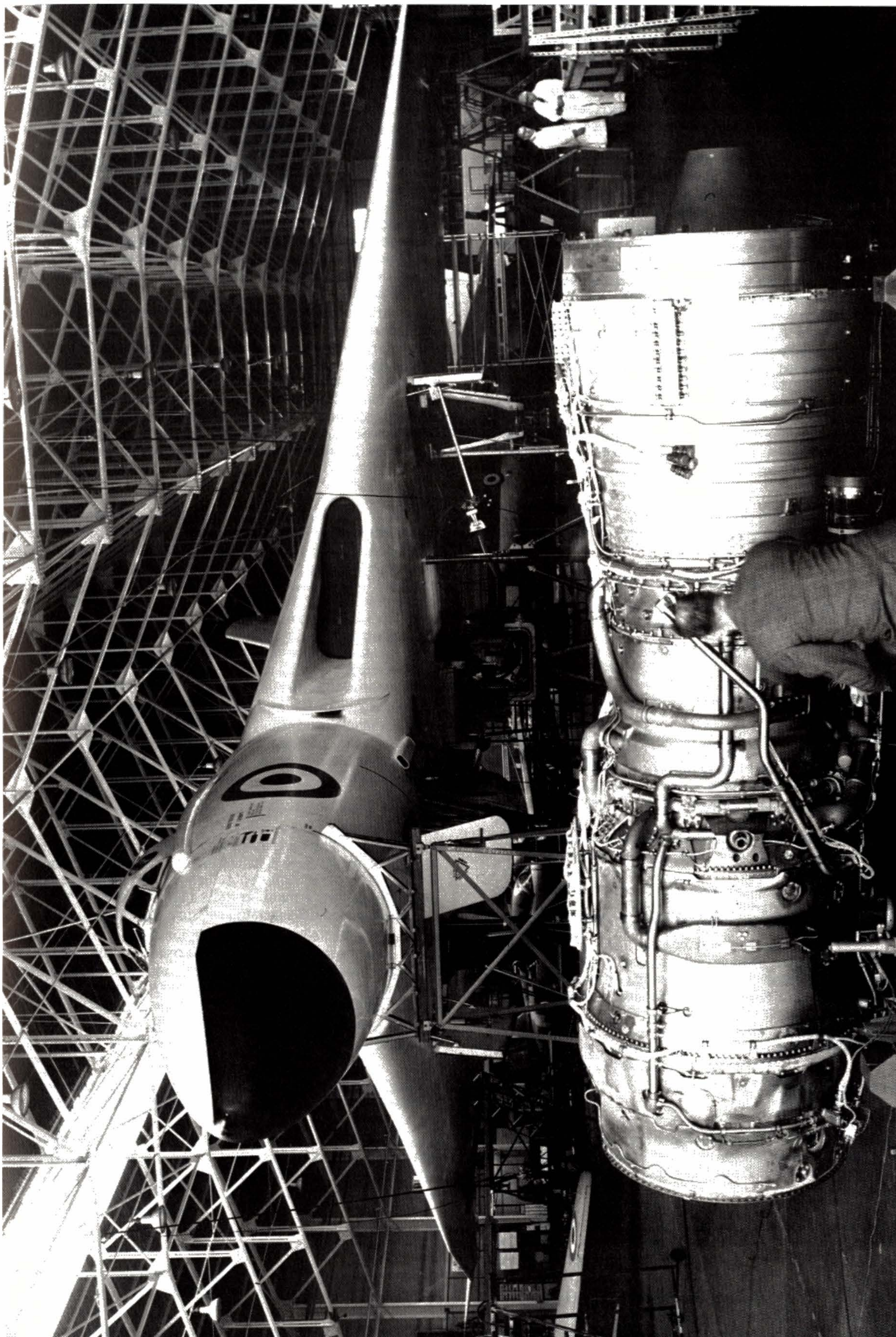


Fig. XI-6 — Les essais en vol du turboréacteur « Olympus 593 » sont effectués sur l'ancien bombardier Vulcan. Le moteur est placé dans une demi-nacelle située sous la soute à bombe du banc d'essais volant (*Bristol Siddeley*)

également vrai pour la voilure où le carburant contenu dans les deux réservoirs de 4m³ chacun, renfermés dans les parties centrales, joue le rôle de volant thermique.

Cette évolution des températures dues à la vitesse de vol, qui pouvait être négligée pour des appareils tels que des intercepteurs (leur régime de fonctionnement n'est supersonique qu'à l'instant du combat) a dû être étudié dans le cas de l'avion Concorde, qui est un appareil commercial.

Devant la complexité des effets d'échauffement, il ne pouvait être envisagé de les prédéterminer. Il a donc été décidé d'en faire l'étude, sinon sur l'avion complet, tout au moins sur des ensembles partiels très importants. On qualifie ainsi d'éprouvette 2,6/2,7 l'élément du fuselage sur lequel sont fixées les armatures de voilure. Cela représente un ensemble de 5 m de longueur (fuselage) et de 20 m d'envergure (départs de voilure). En particulier, les départs de voilure comprennent les réservoirs de carburant. L'ensemble repose sur un radier construit dans un hall de 1 200 m²; compte tenu de travées latérales où sont implantés les appareillages de mesure, de commande et de contrôle, ainsi que les organes générateurs de sollicitations, la surface couverte atteint 2 000 m² (non comprises les aires extérieures où sont placés les réservoirs de stockage des différents fluides).

La représentation des effets de température est obtenue en entourant cette éprouvette d'un ensemble de gaines, pseudo-fixes ou amovibles, rigides ou souples, formant un élément de tunnel aérodynamique dans lequel peut circuler un courant d'air.

Le chauffage, et sa répartition locale, est assuré par rayonnement infrarouge. Le refroidissement (important dans les dernières phases de vol) est obtenu par circulation d'air dans lequel on a injecté de l'azote liquide. Afin de mieux représenter certaines périodes de vol, les deux procédés sont employés simultanément.

L'éprouvette est équipée de très nombreuses jauges afin de mesurer les contraintes locales, ainsi que de thermocouples et de dispositifs pour relever les déformations.

L'importance du volant thermique que représente le carburant contenu dans les réservoirs de carburant a conduit à en faire varier le volume et la température; l'évolution de ce dernier facteur a nécessité un ensemble thermofrigorifique.

Les variations des températures par conduction et surtout par convection sont très progressives et évolutives, et peuvent provoquer l'apparition de criques au cours d'un vol de longue durée. Il est donc très difficile de réduire la durée des essais, par rapport à celle du vol. Il est évident, qu'il est nécessaire de faire appel à un appareillage considérable pour recueillir l'ensemble des résultats et l'on a recherché une automaticité importante pour la commande et la surveillance du déroulement de ces essais.

CHAPITRE XII

ESSAIS EN VOL

Pour le constructeur d'avions, l'heure des essais en vol, c'est l'heure de vérité. C'est durant cette phase ultime que vont se révéler tous les défauts que n'ont pu déceler les essais au sol, si complets soient-ils. On constate en effet que la simulation de l'environnement du vol réel ne peut, qu'être partielle au sol. Autrement dit, les phénomènes contre l'influence desquels le constructeur doit lutter ne peuvent être simulés tous à la fois au sol, alors qu'ils sont tous présents au cours de chaque vol, même si cette présence ne se manifeste pas de la même façon lorsque varient les conditions du vol (vitesses, altitudes notamment).

L'expérience montre qu'une préparation des vols par des essais au sol longs et minutieux contribue d'une manière essentielle à la possibilité de la mise au point en vol. Mais on ne répétera jamais assez, qu'au stade des vols d'essais il n'est généralement plus question d'apporter de grandes différences de forme à l'avion essayé. Une erreur dans le dessin général de l'avion, non corrigée à ce stade n'est plus « rattrapable ». En fait, de telles erreurs ne devraient plus être qu'exceptionnelles, bien qu'elles se produisent de temps à autre, car la morphologie de l'avion classique d'aujourd'hui est le résultat d'un demi-siècle d'expérience ; l'architecte aérien peut sans crainte appliquer les règles de l'art qui sont maintenant bien connues.

Un avion, construit suivant les règles de l'art et soumis à des essais au sol aérodynamiques et structuraux aussi complets que possible, devrait donc être mis au point en vol sans difficulté insurmontable et subir avec succès les épreuves finales de navigabilité (à la suite desquelles il pourra être déclaré sans danger par les utilisateurs).

Ce chapitre sur les essais en vol comprendra plusieurs parties :

— le lecteur sera d'abord familiarisé avec des termes ou notions revenant fréquemment dans le langage des spécialistes des essais en vol ;

— il ne sera pas non plus possible de lui parler des essais en vol proprement dits sans lui donner une idée des gestes élémentaires du pilote, et des moyens dont il dispose pour se représenter la position, l'attitude et le mouvement de son avion dans l'atmosphère ;

— les principaux adversaires du constructeur dans la mise au point en vol pourront alors être présentés.

C'est ensuite seulement que seront évoqués les moyens d'essais en vol très puissants dont on peut disposer actuellement.

Après quelques indications concernant les épreuves finales de navigabilité (certificat de navigabilité pour les avions civils), le chapitre se terminera par l'exposé des problèmes d'environnement, notamment ceux liés au bang sonique et au bruit.

1. LE LANGAGE DES ESSAIS

Pour comprendre ce qui suit il est utile de rappeler quelques termes fréquemment utilisés.

1.1. Vitesses. — La vitesse de l'avion par rapport au sol n'est intéressante que pour la navigation d'un point à un autre et les essais des matériels correspondants. Les spécialistes des essais et les pilotes sont plus intéressés par la *vitesse par rapport à l'air.*

Dans la suite de ce texte les vitesses sont toujours, sauf exception explicite, des *vitesses par rapport à l'air* dites *vitesses-air ;* elles sont désignées par le symbole V.

La composante horizontale de la vitesse V s'appelle la *vitesse propre* V_p et la composante verticale la *vitesse verticale* v.

La vitesse que lit un pilote sur l'indicateur de vitesse usuel ou *anémomètre* ne coincide avec la vitesse V que lorsque l'avion vole auprès du sol. En effet, l'anémomètre n'est qu'un manomètre qui mesure la pression dynamique $\frac{1}{2}\rho V^2$ (V. chap. 1 § 2). Le terme ρ désigne la masse volumique de l'air qui varie avec l'altitude.

Pour graduer l'appareil il faut donc choisir la valeur de ρ correspondant à l'altitude la plus commode pour l'usage de l'anémomètre : celle du sol, à laquelle les manœuvres de décollage et d'atterrissage imposent une lecture directe de la vitesse. Mais lorsque l'avion est éloigné du sol, l'anémomètre indique une valeur conventionnelle très différente de la vitesse-air, par exemple :

vitesse-air :	512 nœuds (947 km/h)
altitude :	11 000 mètres
vitesse indiquée par l'anémomètre :	300 nœuds (556 km/h)

Pour éviter les confusions, lorsque l'on parle des vitesses qu'indique l'anémomètre, on les désigne soit par le terme *vitesse indiquée,* soit par *vitesse conventionnelle* (V. fig. XII-1).

On peut se demander pourquoi les pilotes tolèrent que l'instrument de vol fondamental donne une vitesse fausse en dehors du sol. C'est qu'en réalité le problème immédiat du pilote est de maintenir l'avion entre les vitesses limites autorisées :

— *La vitesse minimale de vol.* — Elle est souvent égale à la *vitesse de décrochage* (symbole V_{min} ou V_s), au-dessous de laquelle l'écoulement irrégulier et instable autour de l'aile n'assure plus un vol normal.

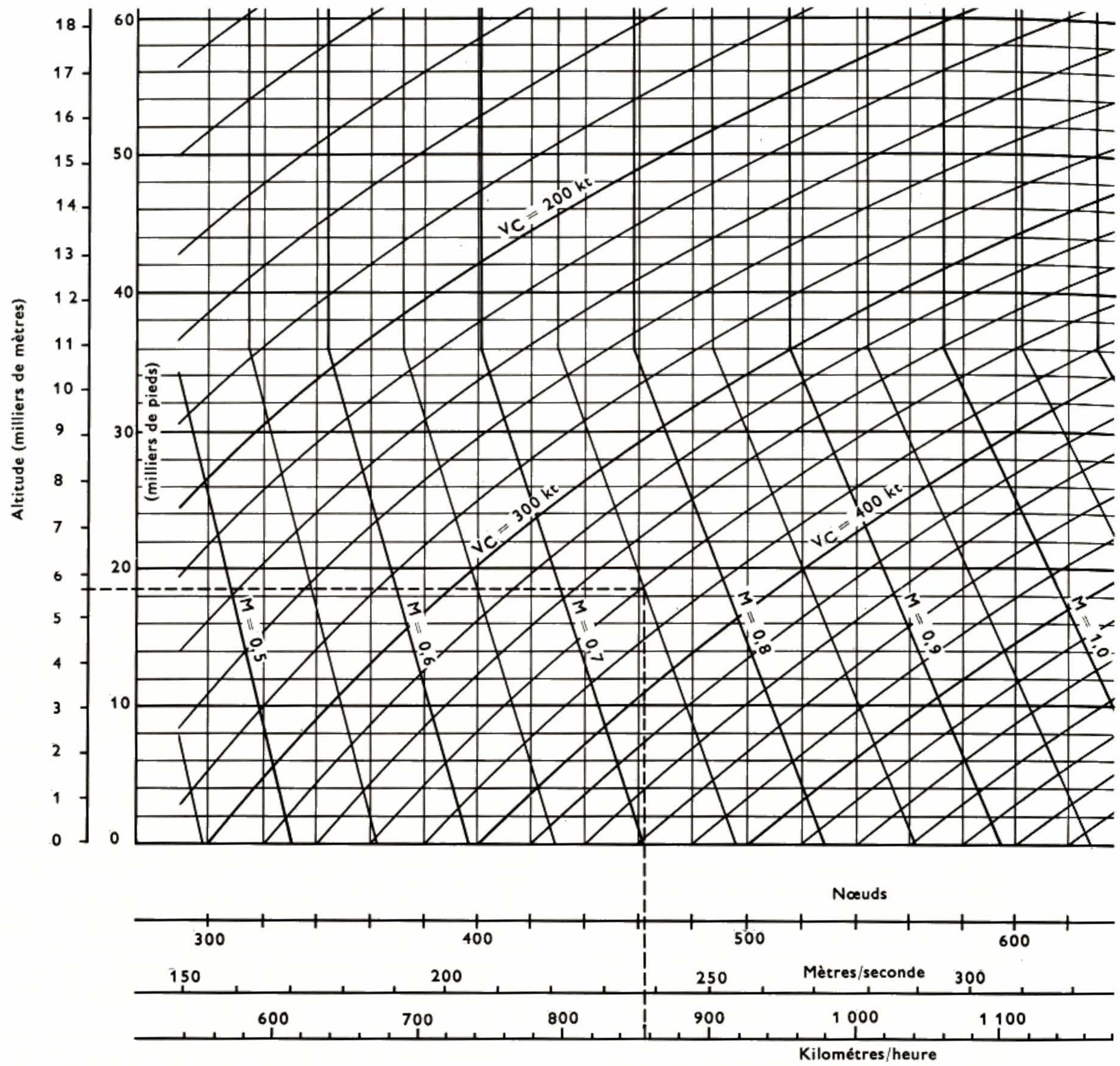


Fig. XII-1 — Relation entre l'altitude, la vitesse V_c conventionnelle fournie par l'anémomètre, la vitesse vraie V par rapport à l'air et le nombre de Mach M. Exemple : à 5 700 mètres d'altitude, l'anémomètre indique 360 nœuds : la vitesse vraie est de 461 nœuds soit 857 km/heure, le Mach 0,75 ; cet abaque est d'usage courant dans les essais en vol ; il couvre les vitesses jusqu'à celles correspondant à Mach 2 (seule une partie de cet abaque est représentée ici)

— *La vitesse maximale de vol* (V_{max}). — Si l'on exprimait ces vitesses en *vitesses-air*, ces limites varieraient dans des proportions considérables avec la masse de l'avion et son altitude de vol. Au contraire, exprimées en *vitesses indiquées*, elles sont beaucoup moins influencées par l'altitude, permettant ainsi au constructeur de donner au pilote des consignes simples dont voici un exemple (quadriplace léger de tourisme N 1101) :

vitesse minimale (indiquée) : 43 nœuds
vitesse maximale (indiquée) : 170 nœuds

Plus généralement on remarquera que les vitesses d'utilisation remarquables de l'avion (vitesse de meilleure montée, par exemple) s'expriment par une valeur constante de la *vitesse indiquée* lorsque la masse de l'avion varie peu.

Les anémomètres ne sont jamais gradués en mètres par seconde ; la graduation en kilomètres par heure n'est conservée que pour certains petits appareils de tourisme. L'unité de vitesse que l'on utilise actuellement pour toutes les vitesses de vol est le nœud (un nœud est équivalent à un mille nautique par heure). L'usage de cette unité est pratiquement obligatoire pour les pays membres de l'O.A.C.I. (Organisation de l'aviation civile internationale). C'est l'abandon du grade comme unité d'angle pour les longitudes et latitudes qui a conduit les navigateurs aériens ou maritimes à remplacer le *kilomètre* (un centième de grade sur un méridien terrestre) par le *mille nautique* (une minute d'arc sur un méridien terrestre). La table ci-après permettra au lecteur de faciles conversions.

Vitesses		
(nœuds)	(kilomètres par heure)	(mètres par seconde)
100	185	51
200	370	102
300	556	154
400	740	205
500	927	257
600	1 111	308
700	1 296	360
800	1 482	411
900	1 667	462
1 000	1 852	514

1.2. Attitudes, incidence, dérapage et leurs relations avec les autres paramètres de vol. — Les trois commandes principales à la disposition du pilote sont :

— la commande de *roulis* qui provoque un braquage des ailerons et fait tourner l'avion autour de son axe longitudinal ;

— la commande de *profondeur* qui provoque un braquage du volet de profondeur (ou des « élevons » sur un avion delta sans empennage). Cette commande permet de faire cabrer ou piquer l'avion (mouvement de tangage). Dans la suite du texte nous appellerons δ_m le braquage du volet de profondeur ;

— la *commande de direction* qui provoque un braquage du *gouvernail* (partie mobile arrière de l'*empennage vertical*) et permet de faire tourner l'avion autour de son axe vertical (mouvement de *lacet*).

Ces commandes permettent au pilote de maintenir l'attitude de l'avion par rapport à l'horizontale, usuellement définie par l'*angle de tangage* (ou *assiette longitudinale*), angle entre l'axe longitudinal de l'avion et le plan horizontal, et l'*angle de roulis* (ou *assiette transversale*), angle entre l'axe transversal de l'avion (perpendiculaire au plan de symétrie) et le plan horizontal.

Généralement, les pilotes disent qu'ils *affichent une assiette* lorsqu'ils amènent l'angle de tangage ou celui de roulis à une valeur prédéterminée (par exemple, lorsqu'ils cabrent l'avion au décollage jusqu'à l'*assiette longitudinale d'envol*) (fig. XII-2 a, b et c).

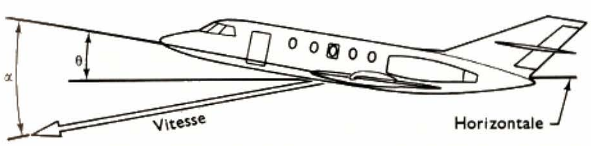


Fig. XII-2 a — Définition de l'incidence α et de l'assiette longitudinale θ



Fig. XII-2 b

Assiette transversale Φ

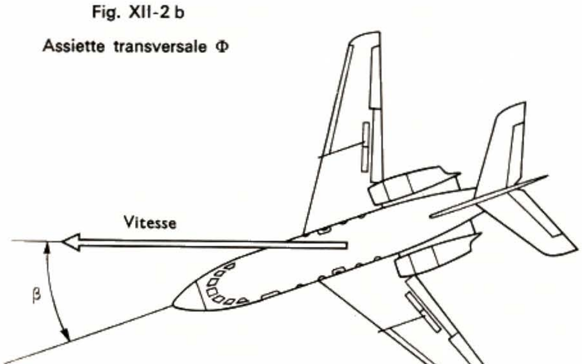


Fig. XII-2 c

Dérapage β à droite

C'est en *affichant des assiettes* déterminées que les pilotes ajustent l'*incidence de vol* ou le *dérapage*.

L'*incidence de vol* α est l'angle entre le *vecteur vitesse* du centre de gravité de l'avion et le plan des ailes ou tout autre *plan de référence horizontale* lié à l'avion. Certains appellent aussi l'incidence *angle d'attaque* et utilisent le symbole *i*.

Lorsqu'un pilote *affiche une certaine incidence*, c'est-à-dire lorsqu'il règle l'incidence à une valeur déterminée, l'aérodynamique (V. chap. 1) enseigne qu'il maintient une valeur constante :

— *du coefficient de portance* C_z,

— *du coefficient de traînée* C_x,

et la mécanique du vol montre, par le jeu de l'équilibre entre le poids et la portance, qu'il maintient une valeur constante de la *vitesse indiquée*.

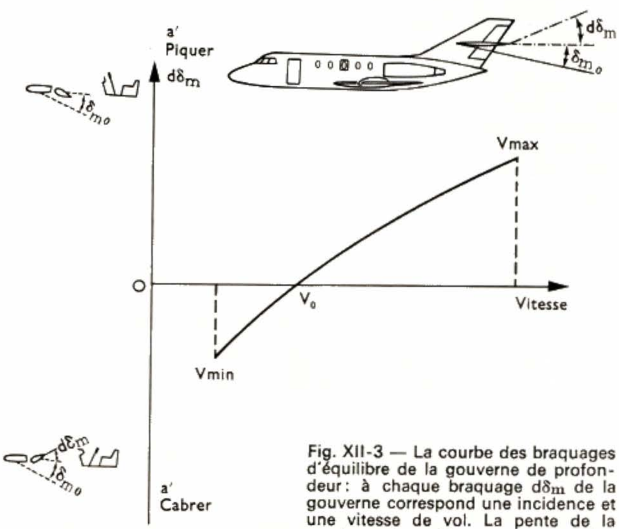


Fig. XII-3 — La courbe des braquages d'équilibre de la gouverne de profondeur : à chaque braquage $d\delta_m$ de la gouverne correspond une incidence et une vitesse de vol. La pente de la courbe est positive pour un avion stable statiquement

Pour un pilote, afficher une incidence ou afficher une vitesse indiquée, cela revient exactement au même. Nous retiendrons seulement qu'aux grandes vitesses correspondent les faibles incidences tandis qu'aux grandes incidences correspondent les faibles vitesses ; en particulier à la *vitesse minimale autorisée* V_{min} correspond l'*incidence maximale autorisée* α_{max} (fig. XII-3).

1.3. Les pressions et températures

— *Pression statique p_a à l'infini amont.* — On désigne par ce terme la pression atmosphérique régnant au point où se trouve l'avion, en l'absence de ce dernier. Dans le langage courant, les mots « à l'infini amont » sont généralement sous-entendus, s'il n'y a pas risque de confusion.

— *Température statique T_a ou θ_a* (à l'infini amont). — On désigne ainsi la température ambiante régnant au point de l'atmosphère où se trouve l'avion, en l'absence de ce dernier. Dans le langage courant, les mots « à l'infini amont » sont généralement sous-entendus, s'il n'y a pas risque de confusion.

— *Pression totale ou d'arrêt p_p.* — Pression que l'on peut mesurer en un point d'arrêt de l'écoulement par rapport à l'avion (pointe avant de l'avion par exemple) à l'aide, par exemple, d'une canalisation débouchant face à la vitesse locale de l'écoulement (fig. XII-4).

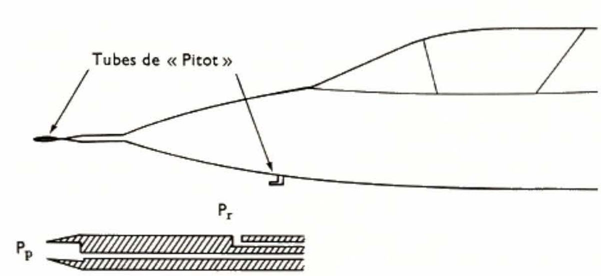


Fig. XII-4

Le procédé universellement utilisé aujourd'hui pour mesurer pressions et vitesses à bord d'un avion a été imaginé par le Français Pitot (1695-1771) pour mesurer la vitesse d'écoulement d'un fluide ; d'où le nom de tube de Pitot et l'appellation pression-Pitot donnée parfois à la pression totale

p = pression atmosphérique vraie

p_r = pression statique brute = $p + dp$

dp = écart de statique

p_p = pression totale ; $\Delta p = p_p - p_r$

T_t = température totale

— *Pression de référence* p_r. — Pression fournie par un orifice sur la paroi de l'avion ou de l'antenne anémométrique choisi de manière à ce qu'elle soit très voisine de la *pression statique* (à l'infini amont) p_a.

— *Pression dynamique* (*vraie*). — C'est l'écart $p_p - p$ (on sous-entend généralement le terme « vrai »).

— *Écart de statique*. — C'est l'écart dp entre la pression de référence p_r et la pression statique (à l'infini amont). L'écart dp est dû, principalement, à la présence même de l'avion qui perturbe la pression p ambiante. On pose par définition et algébriquement (dp pouvant être positif ou négatif) :

$$p_r = p + dp$$

— *Pression dynamique brute*. — C'est l'écart $p_p - p_r = \Delta p$.

— *Pression cinétique*. — Par définition $q = \frac{1}{2} \rho V^2$.

(V : vitesse-air, ρ : masse volumique de l'air atmosphérique au point où se trouve l'avion, en l'absence de ce dernier).

2. L'AVION ENTRE LES MAINS DU PILOTE D'ESSAI

2.1. Les braquages d'équilibre. — La gouverne de profondeur permet d'afficher une incidence de vol. Usuellement cette gouverne est le volet arrière de l'empennage horizontal dit « gouverne de profondeur » (V. fig. XII-3). La partie avant de l'empennage s'appelle le *plan horizontal* dont le calage δ_{m0} est réglable par le pilote sur de nombreux avions. Nous appellerons $d\delta_m$ le braquage du volet de profondeur.

Pour un calage δ_{m0} déterminé il existe une vitesse déterminée de vol rectiligne V_0. Pour stabiliser des vitesses légèrement supérieures ou inférieures à V_0 il faut un braquage $d\delta_m$ de la gouverne de profondeur, que le pilote obtient en exerçant une poussée ou une traction constante sur le manche. La courbe des braquages d'équilibre est l'une des courbes fondamentales déterminée par les essais en vol.

En l'absence d'efforts sur le manche, celui-ci revient « *au neutre* » et la gouverne de profondeur se place sensiblement dans l'alignement du plan horizontal du fait de la pression qu'exerce l'écoulement aérodynamique. Lorsque la courbe des braquages d'équilibre en fonction de la vitesse a une pente positive analogue à celle de la figure XII-3, on montre que l'avion est stable statiquement, c'est-à-dire qu'il existe des forces tendant à le ramener à la vitesse d'équilibre si on l'en écarte.

Les avions sont faits de manière telle qu'une vitesse déterminée puisse être maintenue sans exercer d'efforts sur le manche. On voit donc que, pour un avion à plan horizontal ajustable, cela s'obtient en réglant le « calage δ_m » du plan horizontal.

D'autres méthodes sont également employées (tabs maintenant le volet de profondeur en équilibre avec un certain braquage, servocommandes irréversibles, etc.) ; notre propos n'est pas de les décrire ici, mais de montrer que le pilote dispose :

— d'un organe permettant de régler la valeur de la vitesse d'équilibre V_0 sans qu'il exerce d'action sur le manche ;

— d'un manche permettant de stabiliser des vitesses légèrement différentes.

Pour bien comprendre le mécanisme du pilotage, c'est-à-dire notamment le passage d'une vitesse d'équilibre V_0 à l'autre, nous examinerons d'abord comment vole l'avion sans moteur (vol plané) si le pilote n'intervient pas, cela afin de découvrir les écarts que le pilote aura à maîtriser.

2.2. L'avion livré à lui-même. — Avant d'examiner la façon dont le pilote agit sur le braquage $d\delta_m$ de la gouverne de profondeur pour régler la vitesse de vol, on va considérer un avion dont le stabilisateur est réglé pour le vol, à une incidence α_0 et une vitesse V_0, en vol symétrique, la gouverne restant neutre ($d\delta_m = 0$). Que se passe-t-il si le pilote abandonne les commandes dans des conditions initiales différentes de celles pour lesquelles il a été réglé. Quel sera son mouvement ?

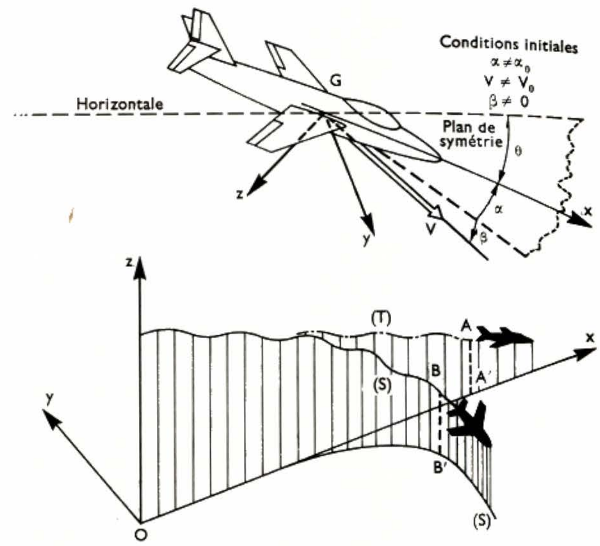


Fig. XII-5 — Livré à lui-même à partir de conditions initiales différentes de celles d'équilibre, l'avion suit une trajectoire complexe

Incidence α et vitesse V au départ sont donc légèrement différentes de α_0 et V_0. De même le départ n'est pas tout à fait symétrique ; il apparaît un petit angle β entre le vecteur vitesse initiale $\vec{V}$ et le plan de symétrie. La trajectoire obtenue dans ces conditions a l'aspect représenté par la courbe S de la figure XII-5, où les axes Ox et Oy sont horizontaux et Oz est vertical ; le plan xOz est pris tangent à la trajectoire S à son origine.

En répétant plusieurs fois l'expérience à partir du même point initial on s'aperçoit que les trajectoires sont assez variées, mais que les courbes d'altitude z en fonction de la distance parcourue sont très voisines l'une de l'autre, ce que l'on exprime en disant que *le mouvement longitudinal de l'avion est indépendant du mouvement transversal*. On constate l'existence d'une oscillation d'altitude, de longueur d'onde assez grande, appelée « *phugoïde* » qui finit par s'éteindre, l'avion ayant à ce moment la vitesse V_0. Une telle oscillation est rarement divergente si l'avion est stable statiquement.

La figure XII-6 donne la variation de vitesse et d'altitude lors d'une oscillation phugoïde convergente. Pour un avion de dimensions normales, la période est de plusieurs dizaines de secondes.

Alors que la vitesse de réglage V_0 est donc longue à atteindre, l'incidence α_0 est obtenue très rapidement, si l'équilibre statique est stable, en quelques oscillations usuellement très amorties (oscillation d'incidence) à basse vitesse, moins amorties à grande vitesse.

Vues en projection sur le plan horizontal xOy les trajectoires possibles présentent les aspects indiqués sur la figure XII-7. L'avion stable en spirale reprend naturellement une route rectiligne. Les avions usuels sont souvent indifférents en spirale ou même légèrement divergents. Dans ce dernier cas, si une rafale provoque une inclinaison latérale, l'avion se met en virage de plus en plus incliné donc de plus en plus serré.

À ce mouvement apériodique se trouve toujours superposé un mouvement d'oscillation de dérapage, analogue à l'oscillation d'incidence et de période courte (quelques secondes), mais moins amorti, même à faible vitesse ; ce mouvement peut, lui aussi, être convergent, divergent ou entretenu. Les paramètres de construction du planeur qui permettent d'obtenir un mouvement stable sont le dièdre δ, la flèche φ et le rappel en girouette (c'est-à-dire les proportions de l'empennage vertical et son « bras de levier »).

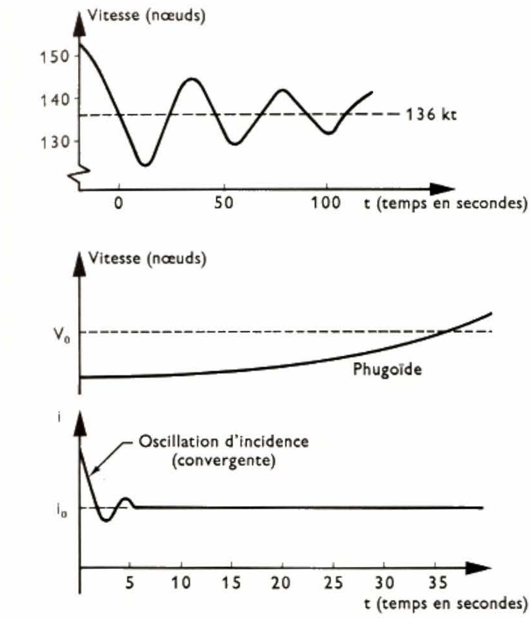


Fig. XII-6 — Le graphique du haut représente un exemple de l'évolution de la vitesse lors d'oscillations phugoïdes ; la pseudopériode est d'environ 45 secondes ; les deux courbes du bas représentent avec une échelle de temps dilatée l'évolution de l'incidence et de la vitesse au début du mouvement ; l'incidence revient après une courte oscillation à la valeur d'équilibre. L'exemple pris est celui d'un avion lent. L'oscillation d'incidence est moins amortie à grande vitesse

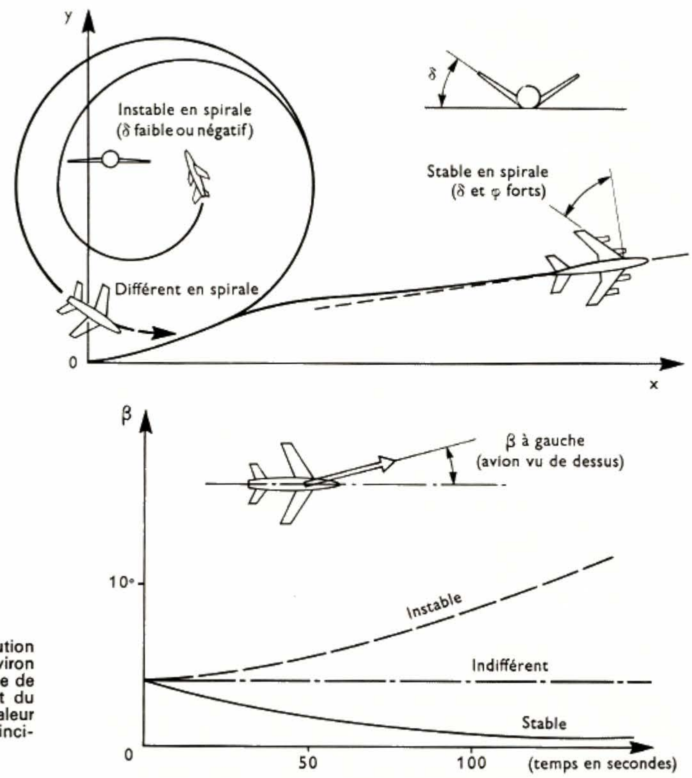
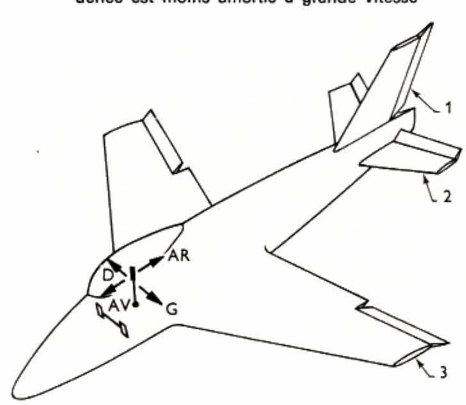


Fig. XII-7 — En haut, vue en plan de la trajectoire complexe suivie par l'avion livré à lui-même ; l'influence du dièdre et de la flèche des ailes est grande sur le type de trajectoire ; le mouvement est dit « spiral ». En bas évolution du dérapage dans le mouvement spiral

2.3. Stabilisation de l'avion par le pilote. — On voit donc que, livré à lui-même, un planeur stable statiquement peut fort bien voler en ligne droite sans intervention du pilote. Mais la moindre rafale atmosphérique va provoquer des mouvements oscillatoires autour de la trajectoire idéale souhaitée, ou une divergence lente en spirale. Le rôle du pilote est donc d'agir sur les gouvernes afin de s'opposer à ces diverses oscillations. La figure XII-8 donne le sens d'action des différentes commandes à la disposition du pilote.

On notera que l'ensemble pilote + avion est un véritable « asservissement », les sens et les instruments de bord permettant à l'homme de détecter les écarts, de déterminer l'action à entreprendre et d'exercer cette action sur l'avion.



1. Palonnier à droite, volet de direction à droite
2. Manche en arrière, volet de profondeur levé (à cabrer)
3. Manche à droite, aileron droit baissé, aileron gauche levé

	Perturbation	Action	Couple principal	Produit secondaire
Tangage	H — Pique	AV — AR	A cabrer	Néant
Tangage	H — Cabre	AV — AR	A piquer	Néant
Roulis	H — Penche à D	G — D	Roulis à G	Lacet
Roulis	H — Penche à G	G — D	Roulis à D	Lacet
Lacet	Dérape à D	D	Lacet à D	Roulis à D
Lacet	Dérape à G	G	Lacet à G	Roulis à G

Fig. XII-8

Stabilisation du planeur par le pilote en vol rectiligne et symétrique

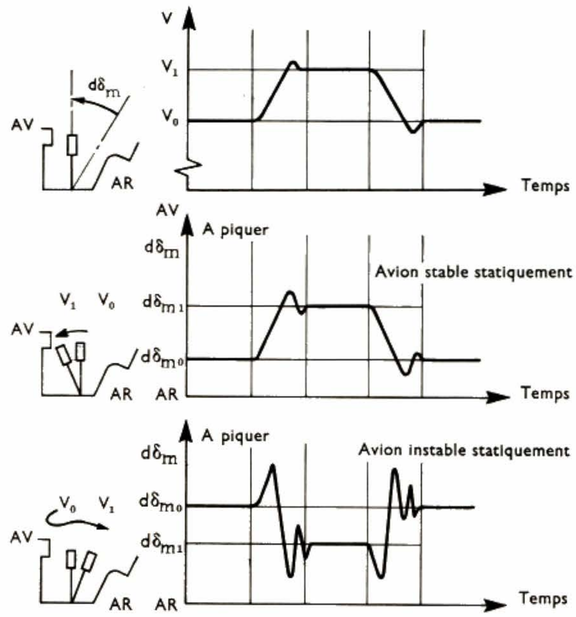


Fig. XII-9 — Mouvement du manche pour régler la vitesse de vol

Quels sont les mouvements du manche nécessaires pour passer d'une vitesse stabilisée V_0 à une vitesse plus grande V_1? La figure XII-9 nous le montre dans le cas d'un avion stable statiquement, et dans le cas d'un avion instable.

Dans le premier cas, le pilote déplace le manche en avant pour faire piquer l'avion et réduire l'incidence. La position finale du manche quand l'avion est stabilisé à la vitesse V_1 est en avant de la position initiale. Nous dirons que l'action initiale sur le manche et le déplacement final sont dans le même sens.

Dans le deuxième cas, le pilote déplace encore le manche en avant pour faire piquer l'avion et réduire l'incidence. Mais comme l'avion est instable, il lui faut finalement faire revenir le manche en arrière de la position initiale pour « retenir » l'engagement au piqué de plus en plus accentué. Dans ce cas, l'action initiale sur le manche et le déplacement final sont inversés de même que se trouve inversée la pente de la courbe de la figure XII-3. Ainsi la vitesse suit assez fidèlement les déplacements du manche dans le cas de l'avion stable, mais très mal dans le cas de l'avion instable (d'où les difficultés du pilotage d'un tel avion).

2.4. Le vol propulsé. — Jusqu'à présent on a supposé que le pilote ne touchait pas aux commandes de propulsion. On va voir maintenant leur action.

On sait que la commande de profondeur permet, par son braquage $d\delta_m$, de maintenir l'incidence ainsi que les coefficients C_x et C_z de traînée et de portance et par suite la vitesse V: de la sorte la traînée R_x et la portance R_z restent elles-mêmes constantes (fig. XII-10).

Si la poussée $\vec{F}$ du propulseur est nulle, la pente γ de descente est fixée, d'une part, par l'équilibre de la portance $\vec{R_z}$ et de la composante du poids $\vec{P_z}$ (pratiquement égale à $\vec{P}$) et, d'autre part, par l'équilibre de la traînée $\vec{R_x}$ et de la composante du poids $\vec{P_x}$ ($P_x = P \sin\theta$; fig. XII-10).

Si la poussée du propulseur devient positive, du fait que l'incidence et la vitesse sont fixées, $\vec{R_x}$ et $\vec{R_z}$ sont les mêmes, mais une partie de la traînée $\vec{R_x}$ est équilibrée par $\vec{F}$, le reste étant équilibré par la composante $\vec{P_x}$ qui peut alors être plus faible. Comme $P_x = P \sin\theta$, la pente γ peut être plus petite. On obtient ainsi $\gamma = 0$ quand la traînée est entièrement équilibrée par la poussée $\vec{F}$ du propulseur. Enfin, une pente de montée positive peut être obtenue si la poussée $\vec{F}$ est assez grande pour équilibrer à la fois la traînée $\vec{R_x}$ et la composante $\vec{P_x}$ du poids.

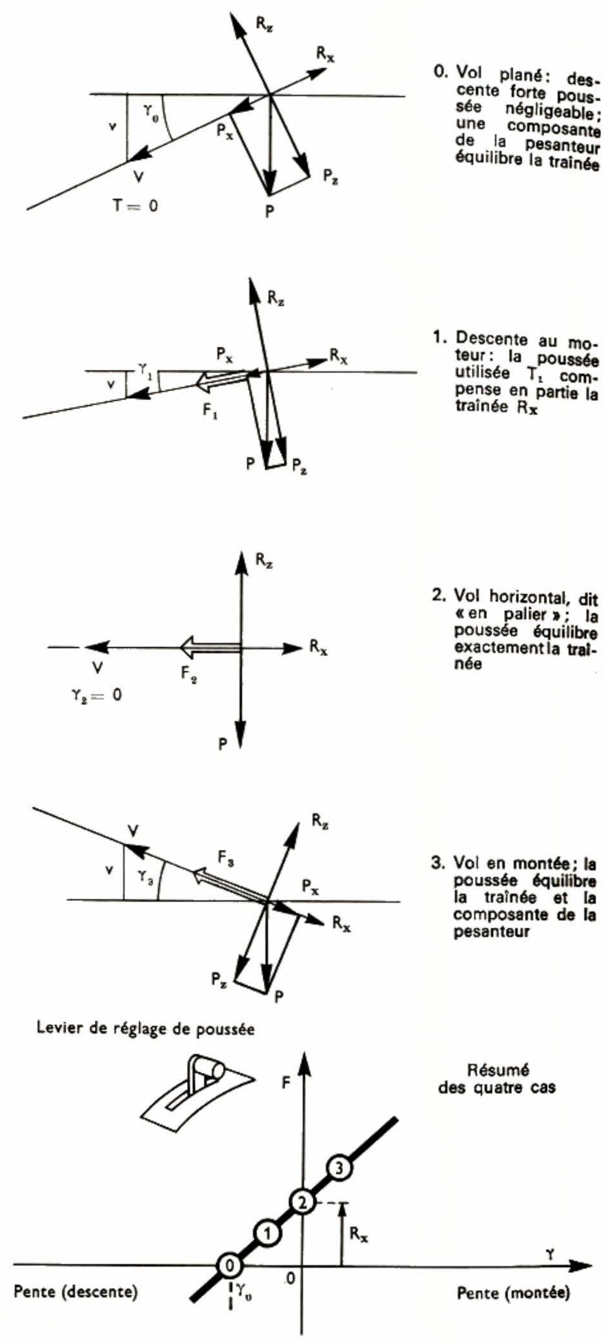


Fig. XII-10 — Quatre cas de vol à la même incidence mais avec diverses poussées

Ainsi :

— la vitesse de vol V, et l'incidence sont maintenues en agissant sur la commande de profondeur (braquage $d\delta_m$) ;

— la pente γ de montée (ou de descente) est réglée par la ou les commandes de réglage de la poussée ou de la traction du propulseur ; on appelle généralement ces leviers les *manettes des gaz*.

2.5. Les instruments et commandes de vol. — La figure XII-11 (page suivante) donne la disposition des principaux instruments de bord nécessaires pour déceler les écarts de l'avion par rapport aux valeurs d'équilibre en vol permanent ; la cabine est celle de l'avion-école *Fouga Magister*. Pour plus de clarté, les symboles des paramètres mesurés sont seuls figurés dans les cercles qui représentent les cadrans des instruments.

On remarquera le manche, servant à la fois de commande de profondeur et de gauchissement, ainsi que le palonnier

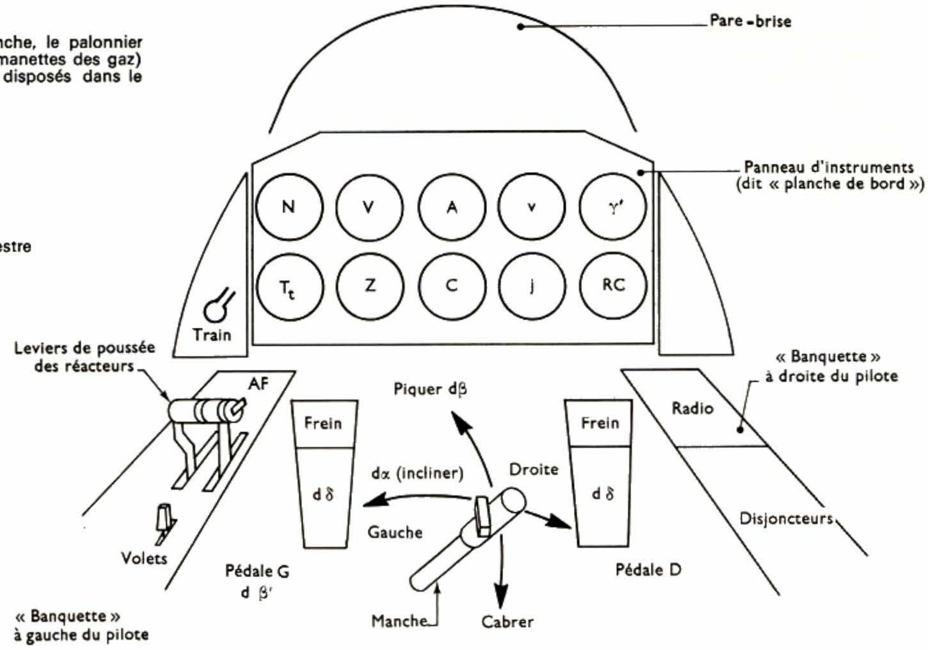


Fig. XII-11

Les commandes essentielles : le manche, le palonnier (2 pédales), les leviers de poussée (manettes des gaz) et les instruments de vol tels que disposés dans le « Fouga Magister »

N = régime des moteurs
V = vitesse indiquée
A = assiettes (inclinaison latérale et longitudinale)
v = vitesse verticale
γ' = accélération normale (en g) multiples de l'accélération terrestre
T_t = température de tuyère
Z = altitude
C = cap
j = dérapage
RC = radiocompas

et les freins sur roues, sur chaque pédale. Un basculeur électrique sur le manche permet de régler l'avion pour qu'il reste à la vitesse d'équilibre choisie V_0. La poussée est réglée par deux leviers (un par réacteur) à gauche. Le symbole AF représente la commande d'aérofreins. Le train est escamotable (levier repéré « train »).

Les instruments essentiels pour le pilote sont :

— L'*anémomètre* est en réalité un simple manomètre sensible à la pression dynamique ; *aux basses vitesses,* celle-ci est égale à : $\frac{1}{2}\ \rho\ V^2$. Aux grandes vitesses la correspondance est donnée par la figure XII-12. L'instrument est gradué de manière à donner la vitesse vraie lorsque l'avion vole près du sol, en atmosphère type, c'est-à-dire que la graduation obéit à l'équation : pression

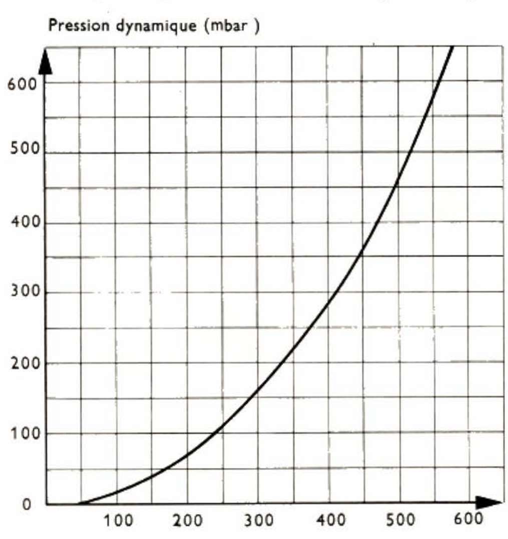


Fig. XII-12

dynamique $= \frac{1}{2}\rho_0\ V^2_c$ (2), où ρ_0 représente la masse volumique de l'air dans les conditions du sol type (15 °C et 1 013 millibars).

La graduation V_c est baptisée *vitesse conventionnelle.* En fait seul un anémomètre parfait donnerait la vitesse conventionnelle : les réalisations pratiques des anémomètres donnent une *vitesse indiquée* V_i très voisine de V_c. On rappelle que l'anémomètre est aussi un indicateur indirect de l'incidence de vol d'où son intérêt, par exemple, pour éviter le décrochage (incidence maximale).

Si l'on utilise l'anémomètre pour connaître la vitesse-air vraie, il faut faire une correction à l'indication brute à l'aide de la formule suivante :

$$V = V_c\sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}}$$

qui est obtenue en égalant les deuxièmes membres des équations (1) et (2) (cette formule n'est applicable qu'à basse vitesse).

— L'*altimètre* n'est qu'un baromètre pour la mesure de la pression atmosphérique p_a ; la correspondance entre p_a et la graduation est établie pour l'atmosphère standard, de sorte que l'altitude lue Z_p diffère de l'altitude vraie Z. Pour passer de Z_p à Z vraie la correction s'exprime approximativement par la formule :

$$Z = Z_p\frac{T}{T_{st}} + \Delta Z$$

où $\frac{T}{T_{st}}$ est le rapport moyen entre les températures absolues de l'air respectivement en atmosphère réelle et en atmosphère standard, et où ΔZ est un terme correctif pour tenir compte de la variation de la pression atmosphérique au sol ; un bouton moleté sur l'appareil permet d'opérer cette correction nécessaire.

Les altimètres sont gradués en pieds, les règles de circulation aérienne imposant le respect de niveaux de vol définis suivant les routes aériennes de 1 000 en 1 000 pieds ; les niveaux de vol autorisés sont numérotés de 100 en 100. Exemple : pour Z_p = 50 000 pieds, le niveau de vol est « 500 ».

— L'*horizon artificiel* mesure l'assiette longitudinale θ, ainsi que l'assiette transversale Φ conformément à la figure XII-13. Cet instrument permet de restituer l'horizon

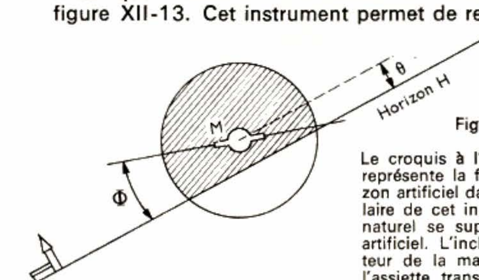


Fig. XII-13

Le croquis à l'intérieur du cercle représente la figuration de l'horizon artificiel dans le cadran circulaire de cet instrument. L'horizon naturel se superpose à l'horizon artificiel. L'inclinaison et la hauteur de la maquette M donnent l'assiette transversale Φ et longitudinale θ

en vol sans visibilité. Comme en vol à vue, l'assiette longitudinale est matérialisée par l'écart angulaire entre la ligne d'horizon et une figurine *M*, appelée « maquette », schématisant l'avion dont elle représente l'axe longitudinal, tandis que l'assiette latérale est fixée par l'angle entre l'axe latéral de la maquette (parallèle à celui de l'avion) et la ligne d'horizon.

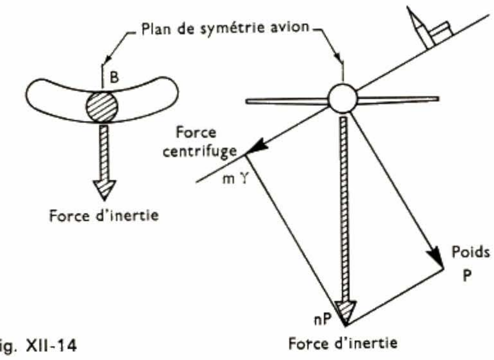


Fig. XII-14

La bille donne la direction de la pesanteur apparente. Les virages s'effectuent « bille au milieu »

— La *bille* est utilisée comme indicateur de dérapage β. En fait, c'est surtout un moyen de s'assurer que les forces d'inertie et de masse donnent une résultante dans le plan de symétrie de l'avion, ce qui est particulièrement utile en virage (fig. XII-14).

2.6. Les manœuvres fondamentales. — Ces manœuvres sont illustrées par la figure XII-15 qui montre un « tour de piste » exécuté dans l'avion école *Fouga Magister*. Le décollage se fait face au vent.

En (1) le pilote, après avoir poussé les manettes de gaz pour obtenir un régime de rotation de 22 600 tours par minute et mis les volets en position « décollage », lâche les freins et roule à incidence nulle. Il cabre l'avion après avoir dépassé la vitesse de décrochage (85 nœuds) en agissant sur la commande de profondeur. L'envol se produit lorsque la vitesse atteint 100 nœuds (100 kt) ; le pilote laisse croître la vitesse jusqu'à 160 nœuds après avoir rentré le train et les volets. Cette vitesse de 160 nœuds est maintenue par le pilote en agissant sur la commande de profondeur. La pente de montée est réduite en réduisant la fréquence de rotation du moteur à 20 000 tr/mn.

En (2) la vitesse est maintenue à 160 nœuds toujours en agissant sur la profondeur, tandis que le pilote engage l'avion en virage en mettant le manche à gauche et le palonnier à gauche ; pour un dosage correct de ces actions le virage sera effectué « bille au milieu ». Le pilote met ensuite l'avion en vol horizontal (palier) en réajustant le régime moteur à 18 000 tr/mn, la vitesse étant toujours réglée par la commande de profondeur.

En (3) nouveau virage amenant l'avion à être parallèle à la piste, donc « vent arrière ». La sortie des aérofreins permet de réduire la vitesse à 140 nœuds en palier.

En (4), train et volets sont sortis (20° de volets) et la vitesse diminue à 120 nœuds par suite de la traînée supplémentaire ; 20 000 tr/mn sont nécessaires pour rester en palier.

En (5) virage de 90° en palier, puis en (6) le pilote réduit pour amorcer la descente. Le régime est ajusté de manière à ce qu'après le dernier virage (7) l'avion soit placé en position correcte pour prendre contact tangentiellement avec le sol.

Dans la phase finale (8) les volets sont complètement sortis, le réacteur réglé pour donner une pente de 4 à 5° ; juste avant l'entrée de la piste le pilote déplace doucement le manche en arrière pour réduire progressivement la vitesse et réaliser « l'arrondi », au voisinage de 90 nœuds. L'avion est alors en vol rasant horizontal. La réduction complète du régime moteur suffit en général pour le faire toucher. Les trois roues sont posées, puis, une action de freinage permet d'immobiliser l'avion.

3. LA « MISE AU POINT » ET L'EXPLORATION DU DOMAINE DE VOL

3.1. Études préliminaires et mise au point. — Les études théoriques et les expériences de laboratoires ont contribué à la conquête de l'air, mais pour une part assez

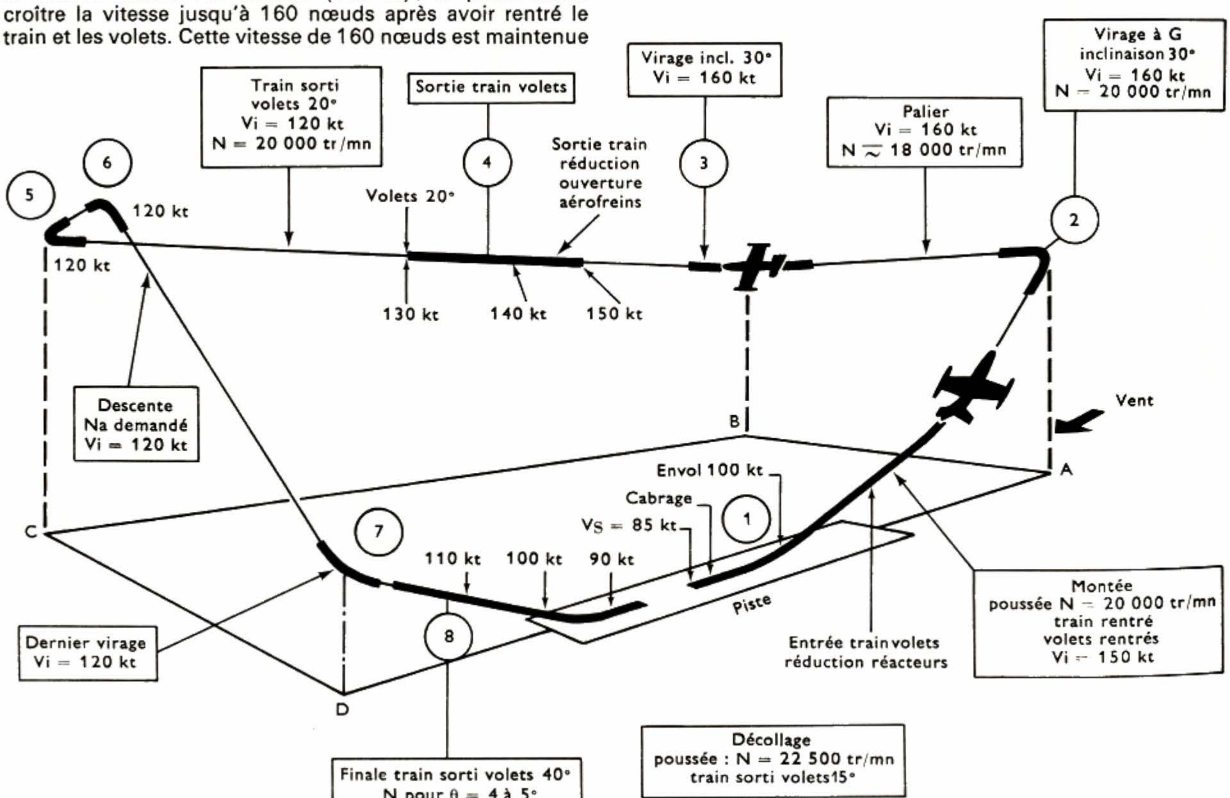


Fig. XII-15

modeste; la découverte des principes du vol mécanique revient, en fait, aux hardis expérimentateurs qui ont tenté de conduire les premières machines volantes, les ont mises au point progressivement en tirant des leçons de leurs échecs et appris à piloter. Les essais en vol ont débuté dès les débuts de l'aviation.

La plupart des pionniers s'acharnaient à cabrer leurs machines dans l'espoir de les voir prendre l'air, jusqu'au moment où Gabriel Voisin et Farman découvrirent le secret: il fallait laisser l'appareil prendre de la vitesse, sans le cabrer, jusqu'au moment où elle devenait suffisante, et cabrer à ce moment-là seulement.

La figure XII-16 donne, à la lumière de nos connaissances actuelles, une explication de cette réussite du décollage, très difficile à cette époque avec des moteurs si peu puissants qu'au-dessous d'une certaine vitesse de vol, donc pour une incidence trop grande, la puissance nécessaire pour vaincre les forces de traînée aérodynamique était plus grande que celle du moteur.

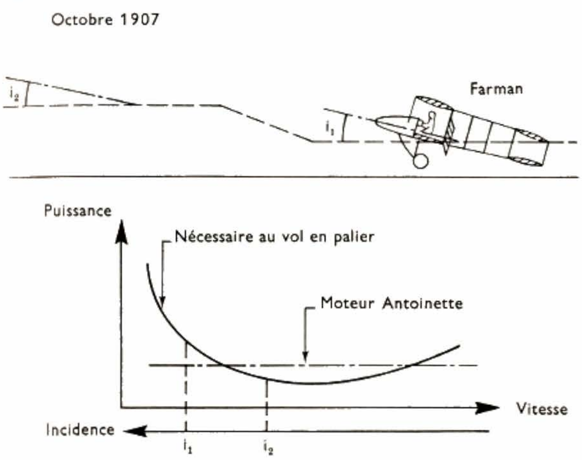


Fig. XII-16

Les pionniers de cette époque ignoraient tout de la mécanique du vol et de l'aérodynamique puisqu'ils avaient à découvrir ces sciences, et cabraient excessivement leurs machines; la découverte de Gabriel Voisin marque donc une étape décisive dans la compréhension des principes du vol.

Aujourd'hui, ces principes sont connus et la forme même des avions s'est standardisée par évolution progressive à partir des machines ancestrales. Les grands constructeurs de l'époque héroïque ont fait naître ainsi des familles d'avions à partir d'un ou deux « ancêtres ». Encore aujourd'hui, un avion dit nouveau est dans la plupart des cas construit en modifiant l'avion précédent.

La genèse d'un avion nouveau comprend plusieurs étapes successives, et dure quatre à cinq ans, pour un avion de complexité moyenne, beaucoup plus pour un avion aussi complexe que *Concorde :*

— Dans la première étape, l'avion est dessiné par le bureau d'études aérodynamiques. Des maquettes de formes légèrement différentes les unes des autres sont « passées » en soufflerie et l'on choisit la forme la meilleure. L'avion est alors dessiné en détail, et la liasse des plans de fabrication est établie, tandis qu'une comptabilité des masses de composants et sous-ensembles est ouverte et soigneusement tenue à jour pour essayer d'obtenir que la masse totale reste comprise entre les limites désirées;

— Au cours d'une deuxième phase, une maquette construite en bois, grandeur nature, figure le « squelette » de l'avion. Cette maquette comporte en effet tous les éléments de structure à l'exception de la « peau », c'est-à-dire du revêtement. Son but est de matérialiser dans l'espace l'emplacement des divers éléments de manière à rectifier les plans de fabrication dans leurs moindres détails. Le passage des commandes principales et canalisations diverses, électriques, pneumatiques ou hydrauliques, peut y être étudié. Cette maquette a bien d'autres usages: elle est même utilisée par l'équipage d'essai et les « clients » qui ont commandé l'avion pour définir avec exactitude le dessin du poste de pilotage, la position et les dispositifs de réglage des sièges pour obtenir une visibilité correcte, l'accessibilité des commandes, la position des instruments, etc. Cette maquette sert beaucoup pendant tout cette phase au cours de laquelle les prototypes sont construits.

Des maquettes « vivantes » sont également construites pour mettre au point les divers systèmes de l'avion (commandes de vol, génération électrique, pressurisation).

Vient ensuite la phase des essais au sol et en vol, menés parallèlement. La structure d'un au moins des prototypes est sacrifiée pour faire les essais de résistance structurale, menés jusqu'à rupture, tandis que le prototype est confié à l'équipe d'essai qui procède aux premiers vols dès que la sécurité de fonctionnement de tous les organes vitaux a été démontrée au sol. Ces premiers vols prolongent donc ces essais de fonctionnement; à ce moment il n'est pas question d'améliorer les qualités de vol de l'avion: il doit voler sans trop de difficultés aux mains d'un *pilote d'essai* si l'étude aérodynamique a été bien faite. Les premiers vols réels sont d'ailleurs souvent précédés de roulements à vitesse de plus en plus élevée, jusqu'à atteindre la vitesse de décollage.

— Lorsque l'avion fonctionne bien au point de vue mécanique, il s'agit alors de le mettre au point, c'est-à-dire de le rendre « navigable »: les qualités de vol et les performances sont retouchées jusqu'à devenir satisfaisantes.

— Ensuite les constructeurs présentent l'avion aux services officiels chargés d'exécuter les essais de navigabilité et de délivrer le certificat de navigabilité (avions civils).

— L'avion peut alors être livré à ses utilisateurs; entre le premier vol et cette livraison, le nombre d'heures de vol dépasse généralement un millier pour les avions de transport subsonique, pour atteindre quatre mille, cas de *Concorde* (V. fig. XII-17).

Quelques exemples de mises au point:

La mise au point d'un avion consiste à déceler ses défauts ou ses faiblesses relatives et à y remédier de manière à rendre l'avion *acceptable*, non pour un pilote d'essai très adroit, mais pour le pilote moyen qui l'utilisera, ou encore, pour un avion déjà très acceptable, de le rendre supérieur à ses concurrents.

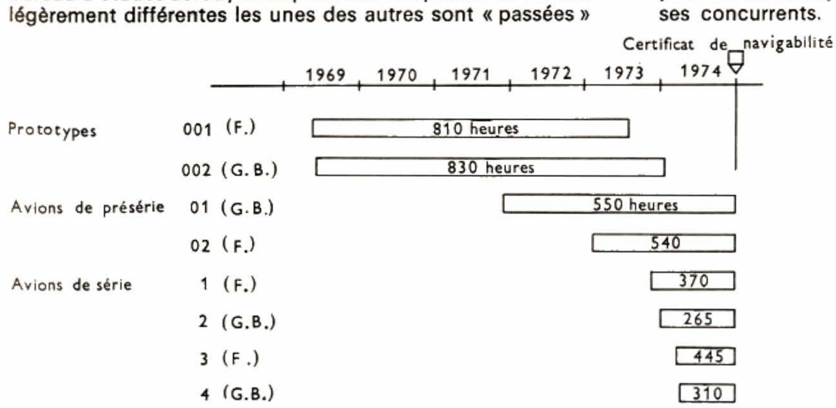


Fig. XII-17

Le programme de mise au point et de certification de Concorde, vu par ses constructeurs en 1973. Ce programme comporte un total de près de 4 000 heures de vol avant l'entrée en service prévue en 1975. Le rythme mensuel des vols croît au fur et à mesure des progrès de la mise au point. Les appareils n° 3 et 4 sont consacrés aux vols d'endurance

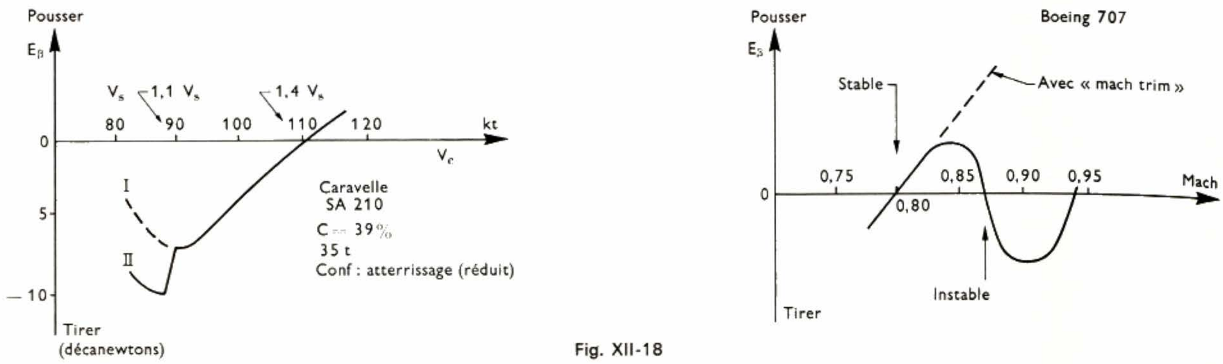


Fig. XII-18

À gauche : correction (en II) du mollissement de l'effort à tirer (en I) aux basses vitesses, sur Caravelle. Eβ désigne l'effort sur le manche (positif à pousser). A droite : l'inversion franche de stabilité statique du Boeing 707 (traits pleins) est corrigée par le « Mach trim » (traits pointillés). Mêmes symboles qu'en haut

Ainsi, par exemple, la figure XII-18 présente la courbe de stabilité longitudinale d'un avion Caravelle dans la configuration d'atterrissage et à la vitesse d'atterrissage ; à l'origine, la courbe présentait un léger « mollissement » de l'effort de 90 à 80 nœuds correspondant à une diminution de stabilité statique près du décrochage. Par un mécanisme asservi, la courbe actuelle a été ramenée au tracé continu : l'avion devient très stable et sa caractéristique de décrochage, déjà bonne, a encore été améliorée.

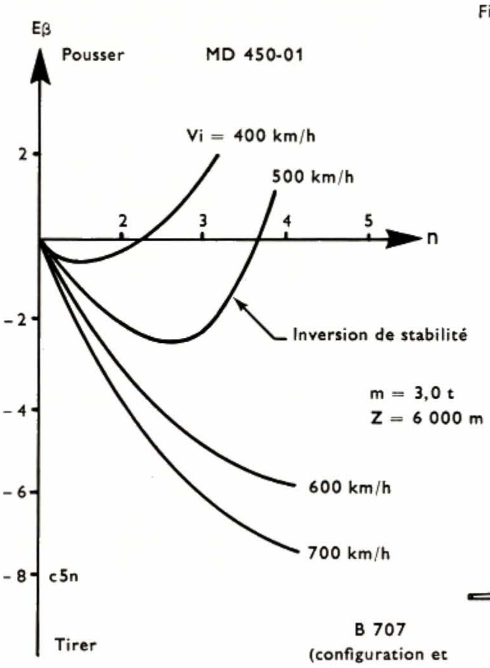
À grande vitesse, le Boeing 707 présente une inversion franche de stabilité entre Mach 0,85 et 0,90 ; il en résulte qu'à Mach 0,85 l'avion est en équilibre instable et a tendance, si celui-ci est rompu, à s'engager en un piqué difficile à contrer aux commandes de profondeur, avec blocage final du Mach aux alentours de 0,94, Mach auquel l'équilibre redevient stable.

Pour corriger ces caractéristiques très dangereuses, il a fallu prévoir (fig. XII-18, à droite) un système dit *Mach trim* redressant la courbe, et améliorant la stabilité de l'avion au voisinage de la vitesse de croisière (Mach 0,80 ou 0,82).

La figure XII-19 a donne un autre exemple d'anomalie d'équilibre en ressource du M.D. 450 prototype. On s'aperçoit qu'à basse vitesse les efforts sur le manche pour maintenir un facteur de charge (1) sont inversés ; l'avion est alors instable et dès qu'en ressource apparaît un facteur de charge supérieur à 1,5 g à 400 km/h, à

(1) Le facteur de charge est le rapport du poids apparent (pesanteur + force d'inertie centrifuge) et du poids réel.

Fig. XII-19 a



Avant d'être mis au point, l'Ouragan MD 450-01 présentait une inversion de stabilité se traduisant par une tendance à l'autoserrage des virages. Ce défaut a été éliminé sur les avions de série

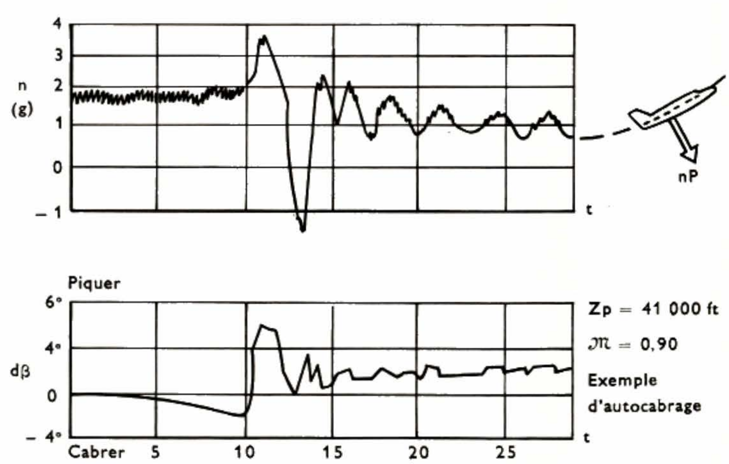
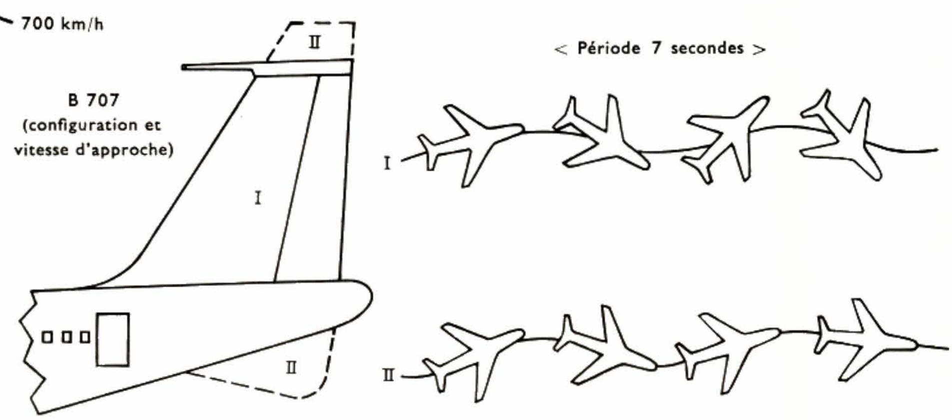


Fig. XII-19 b



Le « roulis hollandais » du Boeing 707. Tout avion a « du roulis hollandais » mais plus ou moins amorti, parfois peu amorti (cas des premiers 707)

2,5 g à 500 km/h, le virage a tendance à se serrer et le facteur de charge à croître de lui-même. L'évolution du facteur de charge consécutif à un braquage lent $d\beta$ de la gouverne de profondeur évolue alors comme le montre la figure : peu après le temps 10,5 secondes, le facteur de charge croît si brutalement que le pilote doit « rendre la main », c'est-à-dire déplacer le manche en avant rapidement pour éviter que l'avion ne décroche ou se brise. Ce mouvement brusque engendre alors des oscillations. Ce défaut a été éliminé sur les avions de série.

La figure XII-19 b présente le mouvement lent de divergence oscillatoire dont les premiers B. 707 étaient affectés aux basses vitesses d'atterrissage. Ce mouvement, appelé parfois « roulis hollandais », était toutefois assez lent pour ne pas être trop dangereux, mais suffisamment tout de même pour justifier l'adjonction de surfaces supplémentaires aux versions ultérieures. Ces surfaces ont augmenté l'amortissement et les oscillations ne divergent plus.

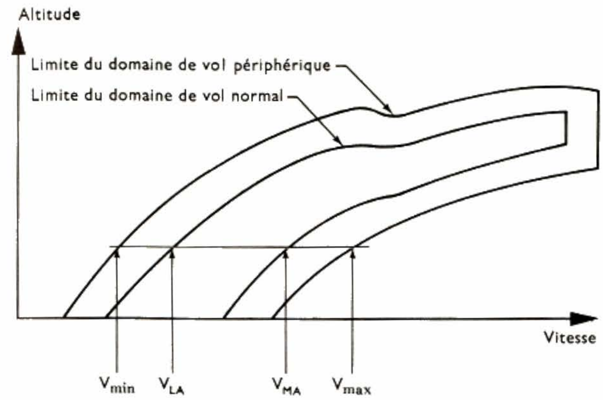


Fig. XII-20 a — Définition du domaine de vol normal et périphérique

3.2. L'exploration du domaine de vol.

— On appelle domaine de vol l'ensemble des vitesses, altitudes, masses et facteurs de charge utilisables.

Le domaine des vitesses et altitudes est défini par :

— une vitesse minimale de vol V_{min} déterminée la plupart du temps par le phénomène du décrochage,

— une vitesse maximale de vol V_{max} déterminée par la résistance structurale.

Entre ces deux vitesses s'étagent les différentes vitesses d'utilisation normale. La plus basse présente une marge de sécurité par rapport à V_{min} ; on l'appelle vitesse limite minimale autorisée V_{LA}. La plus grande vitesse est inférieure, pour les mêmes raisons à V_{max} ; on l'appelle vitesse maximale autorisée, V_{MA}.

Lorsque l'altitude varie, les points représentatifs de ces diverses vitesses engendrent des courbes limites (fig. XII-20 a et b) :

— limite du domaine normal d'utilisation,

— limite du domaine périphérique.

Le domaine périphérique constitue une marge de sécurité dans laquelle seul le pilote d'essai s'aventurera délibérément.

L'exploration du domaine de vol normal et du domaine périphérique est la première tâche qui incombe aux équipages d'essai après le premier vol du prototype.

Les facteurs qui peuvent limiter le domaine de vol sont très nombreux ; sans vouloir en donner une énumération complète, on peut en citer un certain nombre pris comme exemples :

— la pression cinétique,
— le flottement,
— le « mur sonique »,
— la divergence en roulis,
— la chaleur,
— les accélérations,
— le vide.

3.2.1. La pression cinétique et le facteur de charge.

La pression qui s'exerce sur la structure d'un avion croît comme l'énergie cinétique de l'écoulement, représentée par la pression cinétique : $q = \frac{1}{2} \rho V^2$.

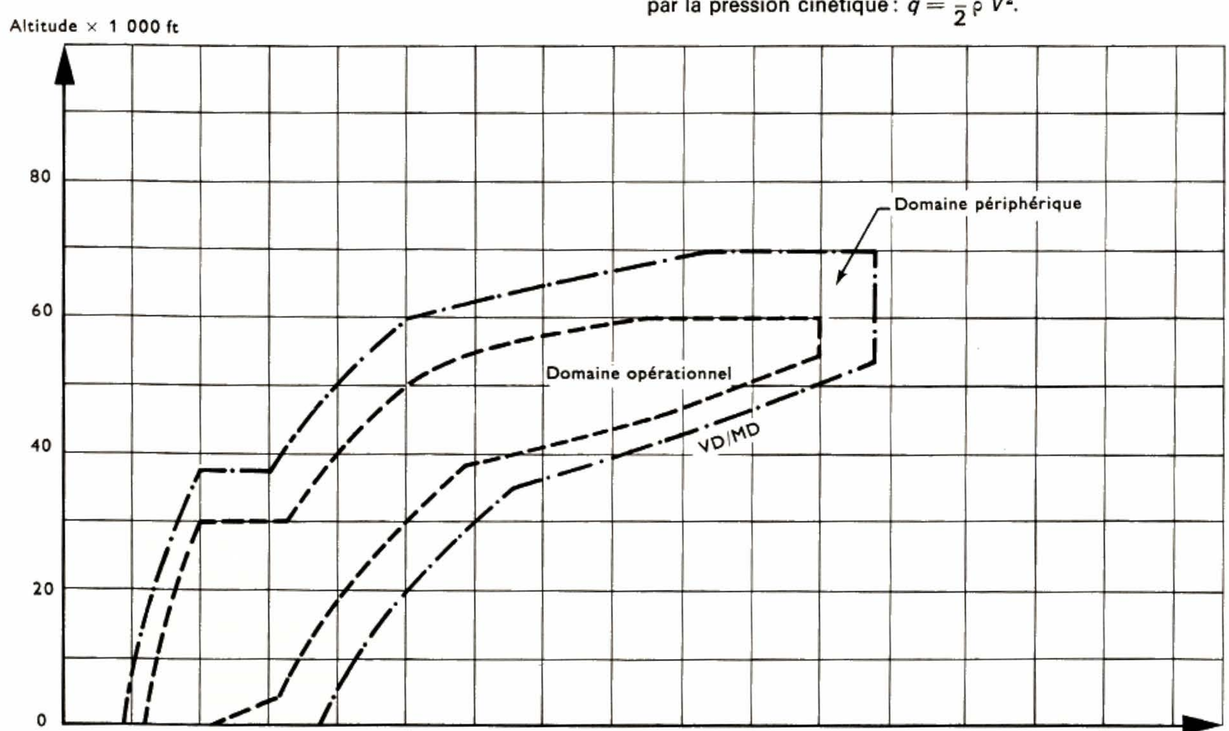


Fig. XII-20 b — Exemple de domaine de vol opérationnel : Concorde

Si l'on désigne par ρ_0 la masse volumique de l'air à 1 013 mbar et 15 °C et par σ le rapport $\frac{\rho}{\rho_0}$, on peut écrire :

$$q = \frac{1}{2} \rho_0 \, (EV)^2$$

Le terme *EV* est baptisé équivalent de vitesse. Aux vitesses faibles, il est très voisin de la *vitesse indiquée*, c'est-à-dire de la vitesse indiquée par l'anémomètre.

Pratiquement, la pression limite que peut supporter une structure d'avion est définie par une certaine valeur de la pression cinétique à laquelle correspond un certain équivalent de vitesse *EV* et une vitesse indiquée qui peut évoluer un peu en fonction de l'altitude.

Le facteur de charge *n* que peut supporter la structure d'avion est, lui, indépendant de la pression cinétique.

En fin de compte, le domaine des pressions cinétiques et facteurs de charge de *limite élastique* de structure présente généralement l'aspect de la figure XII-21 ; les facteurs de charge maximaux et minimaux les plus courants pour les avions de transport sont : — 1 *g* et + 2,5 *g*. Les charges *sûres*, pouvant être atteintes fréquemment, correspondent aux trois quarts des charges dites *limites*.

différemment suivant les vitesses de vol. À certaines vitesses, ils deviennent comparables aux mouvements des ailes des oiseaux.

Chez l'oiseau, ces mouvements sont entretenus par des muscles puissants et ils provoquent son déplacement dans l'air ; pour l'avion, au contraire, lorsqu'il existe, ce mouvement est entretenu par son déplacement dans l'air et l'amplitude de ce mouvement est d'autant plus grande que l'énergie prélevée sur le courant d'air est plus grande.

Pour un tel mode de déformation il peut exister une vitesse, dite vitesse critique, à partir de laquelle l'énergie ainsi transformée en mouvement de déformation des ailes est si grande que l'amplitude croissante et la répétition de ce mouvement conduisent à la rupture de l'aile.

Cette vitesse est assez souvent inférieure à celle de la rupture statique. De plus, ce dangereux phénomène ne se produit pas systématiquement lorsqu'on outrepasse la vitesse critique car le mouvement de déformation entretenu par le courant d'air ne se déclenche que s'il est amorcé par une rafale atmosphérique, fléchissant brutalement l'aile (exactement comme un moteur qu'il faut lancer pour le faire tourner).

On voit comme cet ennemi est insidieux : à une époque où il n'était pas connu, les pilotes s'aventurant à une grande vitesse, mais qu'ils croyaient sûre puisque inférieure à celle de la rupture statique, dépassaient en réalité la vitesse critique de flottement ; rien ne se passait alors tant que l'atmosphère restait bien calme mais, à la moindre rafale, c'était la catastrophe.

Aujourd'hui, cette vitesse critique est déterminée par le calcul pour chaque avion et pour chaque mode de déformation ; on vérifie que le domaine de vol est exempt de flottement par des essais très délicats. Au cours de ces essais la vitesse est progressivement et prudemment augmentée, tandis que des dispositifs spéciaux excitent les vibrations suivant les différents modes de déformation structurale afin de mettre en évidence leur amortissement.

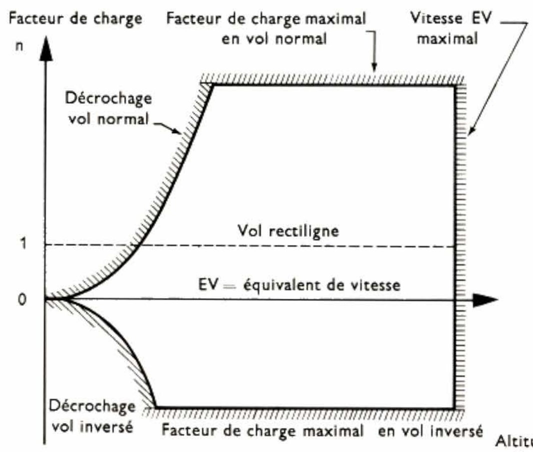


Fig. XII-21 — Diagramme des limites de facteur de charge

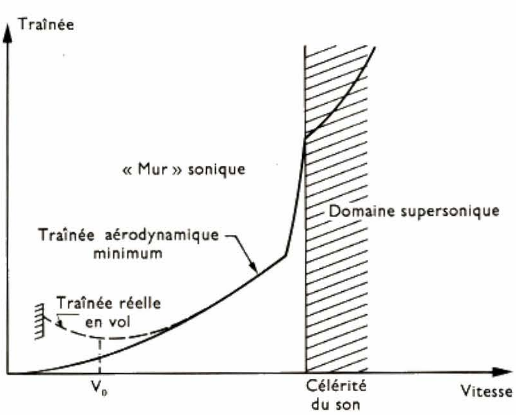


Fig. XII-22 — Le mur sonique correspond à une augmentation brutale de la traînée

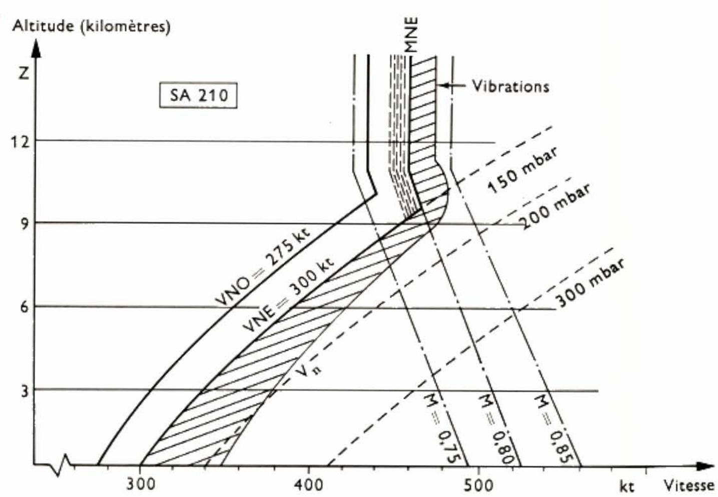


Fig. XII-23 — Limites du domaine des grandes vitesses d'un Caravelle. Ces vitesses s'expriment en vitesses conventionnelles (§ 3.2.1) ou nombre de Mach. Les courbes cotées 150, 200 et 300 mbar sont les courbes d'égale pression dynamique

3.2.2. Le flottement ou divergence structurale. — En fait, très souvent ce n'est pas le phénomène de rupture statique qui limite la vitesse, mais plus souvent la rupture par fatigue sous l'effet des rafales atmosphériques, qui imposent aux ailes des charges alternées.

De plus, un avion est constitué d'un assemblage complexe de pièces métalliques dont la rigidité est loin d'être aussi grande que celle de l'éprouvette unique, et cette souplesse est responsable d'une autre cause de *mort de l'avion par flottement*.

La naissance d'une rupture par « flottement » est essentiellement liée à la façon dont se déforme l'avion. Ainsi l'aile peut fléchir transversalement et se tordre, et les deux mouvements de flexion et de torsion sont liés entre eux

3.2.3. « Le mur sonique ». — Les chapitres consacrés à la mécanique du vol ont familiarisé le lecteur avec la constatation que l'avion éprouve une plus grande résistance à son mouvement lorsque sa vitesse dépasse la célérité du son. Cette résistance, traduite par la figure XII-22 en haut, montre que le « mur du son » se présente comme une augmentation brutale de la traînée aérodynamique.

Pour un avion subsonique l'approche de la célérité du son se traduit par des vibrations importantes de l'avion qui obligent souvent à lui interdire de dépasser certains nombres de Mach. Ainsi à la limite de vitesse indiquée *VNE* s'ajoute généralement une autre limite *MNE*, que présente la figure XII-23 pour un avion comme un Caravelle.

Mais d'autres obstacles à la progression de la vitesse,

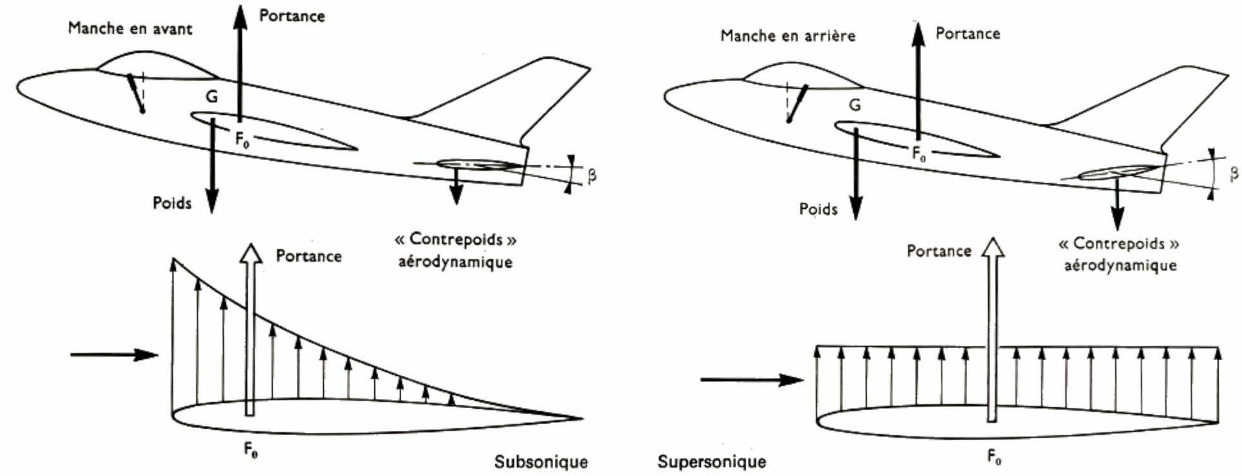


Fig. XII-24 a — En haut: équilibre de l'avion. En bas: répartition des pressions sur l'aile qui modifie cet équilibre au passage en supersonique et provoque une inversion de stabilité transsonique

au-delà de la célérité du son, sont liés à un déséquilibre longitudinal de l'avion. Ces difficultés peuvent être comprises sans peine si l'on remarque que l'écoulement supersonique de l'air sur une aile d'avion n'est pas du tout le même que l'écoulement subsonique. Il en résulte alors un très brutal changement d'équilibre de l'avion.

Aux vitesses subsoniques, chaque partie de l'aile contribue à l'établissement des pressions sur la totalité de la surface portante. Il en résulte, comme l'indique la figure XII-24, a une accumulation des forces portantes élémentaires sur l'avant du profil, ce qui fait que la portance aérodynamique s'applique au quart avant du profil.

En revanche, en supersonique, l'écoulement de l'air est plus rapide que la propagation des pressions, puisque celles-ci se propagent à la célérité du son. Chaque partie de l'aile agit pour son propre compte, et la répartition des forces de portance élémentaires sur le profil est uniforme; la résultante aérodynamique s'applique alors au milieu du profil.

On voit sur la figure qu'il en résulte un changement très brutal des conditions d'équilibre de l'avion lorsqu'on passe du subsonique au supersonique; le poids de l'avion s'applique toujours au même point, tandis que la portance recule brusquement.

Pour simplifier, on va considérer un avion à empennage horizontal « monobloc » (tout le plan horizontal est déplacé lorsque le pilote déplace le manche).

Si l'on s'imagine l'avion suspendu par son foyer F_0, le poids étant équilibré par le contrepoids aérodynamique que fournit l'empennage, on voit que le « bras de levier » du poids de l'avion augmente fortement en passant du subsonique au supersonique (il double sur la figure). Il en résulte donc que le contrepoids aérodynamique, dont le bras de levier est pratiquement inchangé, doit donc augmenter (doubler dans le cas de la figure) pour que l'équilibre soit assuré en supersonique; la commande de profondeur, qui fournit ce contrepoids, doit donc être braquée vers l'arrière lorsque l'avion passe en supersonique, pour augmenter le « contrepoids ».

Mais il n'est pas toujours certain que ce contrepoids puisse être effectivement augmenté car l'efficacité de l'empennage est moindre en supersonique qu'en subsonique et, de plus, il n'est pas certain que le pilote ait assez de force pour braquer la gouverne à la position convenable, si celle-ci est directement actionnée par l'intermédiaire d'un système de leviers (cas des premiers avions qui ont « heurté le mur »).

Si un avion à commande directe de ce type est mis en piqué très accentué, le pilote a d'abord l'impression que le nez devient lourd; pour retenir l'avion, il lui faut tirer de plus en plus en piqué, tandis que la vitesse augmente sans que le pilote puisse maîtriser l'avion; heureusement beaucoup des avions, sur lesquels cette aventure pouvait arriver en vol à très haute altitude, ralentissaient d'eux-mêmes en arrivant dans les couches d'atmosphère plus dense, ce qui permettait alors au pilote de retrouver la maîtrise de l'avion, souvent au prix d'une « ressource » très brutale, l'empennage retrouvant son efficacité aux vitesses subsoniques.

Ce phénomène d'engagement en piqué est caractéristique d'une instabilité statique, puisque pour passer d'une vitesse à une autre plus grande, il faut d'abord faire piquer l'avion par un mouvement du manche en avant, puis le retenir en plaçant le manche en arrière de la position initiale (fig. XII-24 b).

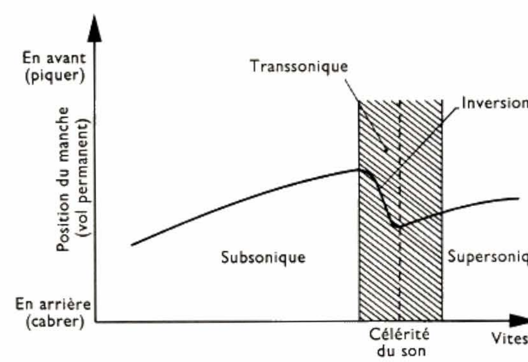


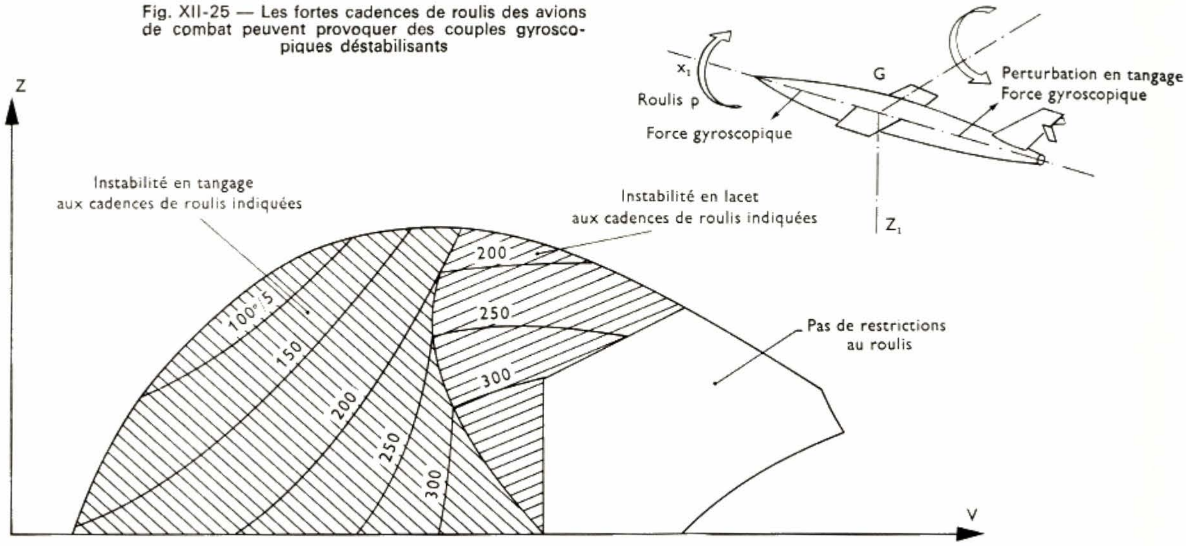
Fig. XII-24 b — Inversion de stabilité transsonique

On voit ainsi que le franchissement du mur du son entraîne une inversion de la stabilité statique de l'avion. Il se produit une inversion de pente de la courbe des *braquages d'équilibre* et il est parfois nécessaire de la compenser par des dispositifs particuliers.

3.2.4. La divergence en roulis. — Les avions supersoniques ont donc une grande efficacité des gouvernes de profondeur pour leur permettre de voler en supersonique. Il en est de même des gouvernes de gauchissement. Mais celles-ci permettent alors de grandes vitesses de roulis. Dans sa rotation autour de l'axe longitudinal, l'avion ressemble à un gyroscope. S'il éprouve un mouvement de rotation en tangage, provoqué par le pilote ou par les mouvements atmosphériques, il naît alors un couple gyroscopique qui peut être supérieur au rappel aérodynamique que fournit l'empennage. L'avion se met alors « en travers », c'est-à-dire que le dérapage (angle entre le vecteur vitesse et le plan de symétrie) devient très important, et l'avion se brise (V. fig. XII-25).

Il existe aussi une possibilité de divergence en tangage sous l'effet d'une rotation de lacet; elle conduit, par exemple, à restreindre les cadences de rotations autorisées en roulis.

Fig. XII-25 — Les fortes cadences de roulis des avions de combat peuvent provoquer des couples gyroscopiques déstabilisants



3.2.5. La chaleur. — Le frottement de l'air contre la paroi de l'avion échauffe fortement celle-ci. Elle l'échauffe d'autant plus que la vitesse est plus grande.

Certains points de l'avion sont d'ailleurs plus sensibles que d'autres; ce sont, en particulier, les parties avant où l'écoulement de l'air par rapport à l'avion est ralenti jusqu'à s'arrêter un court instant.

En ces « points d'arrêt », la totalité de l'énergie cinétique de l'écoulement est transformée en pression et en chaleur. Les valeurs de la pression et de la température en ces points d'arrêt s'appellent pressions et températures d'arrêt.

L'écart ΔT entre la température d'arrêt et la température atmosphérique, exprimé en degrés Celsius croît en fonction de la vitesse V, comme l'indique le tableau suivant.

Température (degrés Celsius)	0	5	125	250	1 000	2 000	4 000
Vitesse (mètres par seconde)	0	100	500	700	1 400	2 000	2 800

Ce tableau résulte de l'équation :

$$\Delta T = \frac{V^2}{2\,000}$$

Au-delà de 600 m/s (vitesse de *Concorde*, en altitude) il faut abandonner les structures en aluminium, trop sensibles à la température, et utiliser le titane. On voit que pour une température atmosphérique de 0 °C, à 1 400 m/s, on atteint la température de l'acier chauffé à blanc ; on comprend donc la difficulté qu'il y a à concevoir des structures légères.

Bien entendu, ces températures sont des extrêmes, et si l'air atteint cette température, la paroi de l'avion à son voisinage n'est pas tout à fait aussi chaude, car le rayonnement et la convection contribuent à l'évacuation d'une partie de la chaleur. De plus, il y a sur l'avion des points moins chauds que d'autres. Cependant la transmission de la chaleur est assez lente pour que la durée d'échauffement de l'avion joue un rôle considérable.

On voit qu'il est malaisé de définir un « mur de la chaleur » puisque le phénomène est continu et que les limites thermiques du vol, comme les limites de résistance à l'écrasement, dépendent à la fois des méthodes de construction et de refroidissement de la structure adoptées sur l'avion, et de la durée d'exposition à la chaleur.

Il apparaît d'une manière évidente que si l'échauffement de l'avion est dû au frottement de l'avion dans l'air, moins il y a d'air, moins grand est l'échauffement. La limite thermique correspondant à une température maximale de paroi donnée, en vol permanent, correspond donc à des vitesses de plus en plus grandes au fur et à mesure que l'altitude augmente.

Le calcul d'une telle limite est très difficile vu le nombre de phénomènes en jeu ; la figure XII-26 en donne un

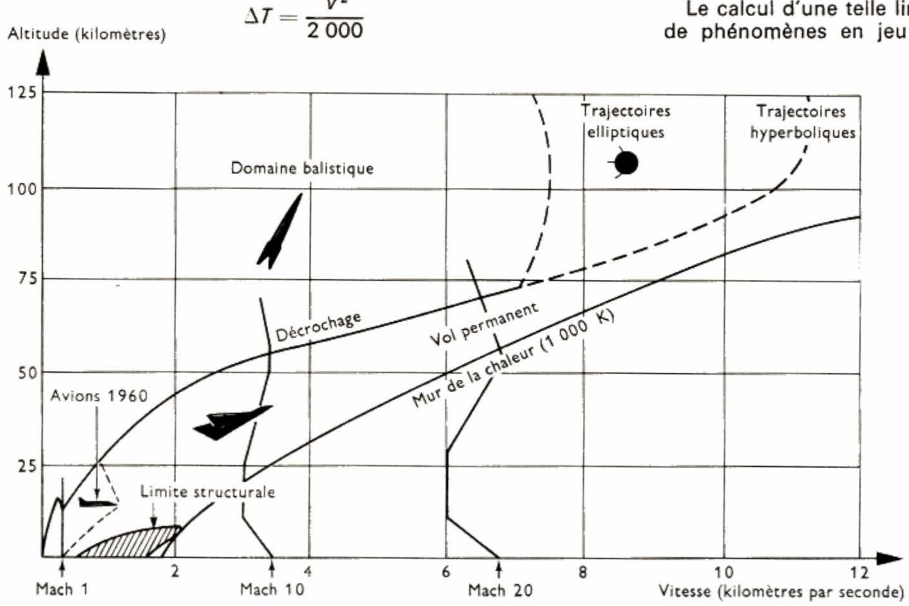


Fig. XII-26

Corridor du vol permanent

exemple, établi pour une température de paroi voisine de 700 °C. On voit que le problème thermique disparaît à une altitude proche de 90 km.

Le problème thermique se pose avec acuité pour l'avion mais il est encore critique à des vitesses plus basses pour le pilote qui ne peut survivre à une température supérieure à 50 ou 60°. Aussi est-il nécessaire de refroidir le pilote par injection d'air froid dans la cabine et même dans sa combinaison de vol.

3.2.6. Les accélérations. — L'accroissement des vitesses de vol se heurte à un autre obstacle qui est celui des accélérations ; en effet, pour être utilisable, l'avion doit pouvoir incurver sa trajectoire ; or, la force d'inertie centrifuge est, dans une courbe de rayon déterminé, proportionnelle au carré de la vitesse.

Le pilote comme l'avion doivent alors pouvoir supporter l'énorme accroissement de leurs poids apparents respectifs.

Or, l'homme, plus fragile que l'avion, peut difficilement supporter d'une manière continue un poids apparent supérieur à cinq fois son poids réel ; ses muscles deviennent insuffisants pour mouvoir ses membres, eux aussi cinq fois plus lourds, et le cœur s'épuise à pomper un sang cinq fois plus dense, sang qui s'accumule dans la partie inférieure du corps, vidant le cerveau, puis bientôt le cœur, qui finit par s'arrêter. Cependant, l'homme arrive à supporter des accélérations beaucoup plus importantes (dix à douze fois l'accélération de la pesanteur *g*), comme celles produites lors de l'utilisation du siège éjectable (qui permet au pilote de sortir de son avion en perdition) mais seulement un très court instant. De plus, des vêtements spéciaux comprimant les parties inférieures du corps lorsque celui-ci est soumis à une augmentation du poids apparent, lui permettent, en évitant l'accumulation du sang, de supporter sans risques six à sept fois son poids réel, donc une accélération six à sept fois plus grande, pendant un temps relativement long.

On voit cependant que les possibilités de virage d'un avion sont d'autant plus réduites que la vitesse est plus grande, comme le montre le tableau ci-après, qui donne les rayons des virages horizontaux correspondant aux diverses vitesses, cela pour une force d'inertie centrifuge faisant supporter au pilote environ cinq fois son poids réel.

	Vitesse (mètres par seconde)					
	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Rayon de virage (kilomètres)	1,25	5	20	80	320	1 280

3.2.7. Le vide. — Au fur et à mesure que l'altitude augmente, la masse volumique de l'air diminue et devient bien vite insuffisante pour permettre la respiration, donc la vie.

Les poumons doivent absorber chaque minute une masse d'oxygène fixée entre des limites assez étroites pour que la vie reste possible, limites qui dépendent d'ailleurs de l'activité physique du sujet (on compte 0,5 kg d'air par minute et par passager pour un avion de transport).

Comme le pourcentage d'oxygène dans l'air est indépendant de l'altitude (environ 21 %), on voit que la quantité d'oxygène respirable diminue avec l'altitude, comme diminue la masse volumique de l'air.

Il existe donc une altitude à laquelle des troubles apparaissent, la quantité d'oxygène étant insuffisante. Cette altitude est très variable suivant les individus, leur entraînement et leur activité physique, comme l'ont parfaitement démontré les expéditions himalayennes.

Ainsi dans une expérience portant sur cent hommes de 20 à 30 ans, assis dans un caisson d'où l'on extrayait l'air, on a obtenu en fonction de l'altitude équivalente atteinte, les nombres suivants de pertes de connaissance (V. tableau)

Ces pertes de connaissances ne sont dangereuses pour la vie que si elles excèdent une certaine durée. Elles sont toujours précédées d'une diminution des facultés intellectuelles.

Altitude (mètres)	Pertes de connaissance
5 000	3
6 000	17
7 000	55
8 000	20
9 000	5

On voit qu'il est nécessaire de suppléer au défaut d'oxygène dès que l'on dépasse une altitude de 5 à 6 000 m.

La première solution consiste à employer un masque inhalateur alimentant les poumons à partir d'oxygène comprimé dans des bouteilles d'acier, et détendu à la pression de la cabine de pilotage. Ces masques sont depuis longtemps utilisés dans l'aviation mais il faut bien comprendre qu'ils ne sont pas suffisants pour atteindre les très hautes altitudes. Le contact entre le visage et le masque n'est pas étanche en général, si bien que l'oxygène peut difficilement être fourni à une pression supérieure à la pression qui règne dans la cabine du pilote et qui est voisine de la pression atmosphérique ambiante. Lorsque celle-ci devient inférieure à la pression d'oxygène constante nécessaire aux poumons, le masque ne fournit plus assez d'oxygène.

Ainsi, à 11 500 m, la pression atmosphérique est égale à la pression partielle de l'oxygène dans les couches de l'atmosphère voisines du sol (210 millibars). Pour cette raison on peut considérer que cette altitude de 11 500 m est la limite supérieure d'utilisation des seuls masques à oxygène.

Cette altitude a pu être légèrement augmentée en améliorant l'étanchéité des masques qui permettent alors une surpression d'oxygène plus grande. Cependant, ce gain est limité par la gêne respiratoire qui résulte de la surpression dans les poumons par rapport à l'extérieur du corps.

Une solution plus radicale consiste à utiliser une cabine de pilotage étanche, dans laquelle l'air atmosphérique est comprimé pour reconstituer les conditions régnant dans les basses couches atmosphériques. Dans les avions de transport actuels, on reconstitue ainsi les conditions régnant à l'altitude de 2 500 m, largement tolérée par tous, jeunes ou âgés. Il en résulte une difficulté matérielle de réalisation de la cabine d'autant plus grande que l'altitude de vol est plus grande. Alors que sur les appareils transatlantiques à hélices, comme le Super-Constellation volant à 6 000 m, la cabine doit supporter une pression de 280 mbar, celle des avions à réaction comme Caravelle doit supporter à chaque vol un gonflement sous une pression de 550 mbar (celle de *Concorde* atteint 750 mbar) ; c'est une répétition des opérations de mise en pression de la cabine qui fut responsable des éclatements des cabines des premiers « Comet ».

On conçoit la difficulté d'une telle construction, puisque la résistance ne doit pas être obtenue au détriment de la charge marchande. On se rend compte aussi de la nécessité de réduire le risque d'explosion en diminuant la surpression de la cabine pour les avions de guerre, dont l'étanchéité de la cabine est à la merci d'un projectile. On admet en général deux surpressions possibles, l'une de 250 mbar, l'autre de 150 mbar ; la dernière n'est utilisée qu'en cas de combat. Les conditions qui règnent dans la cabine sont généralement les suivantes :

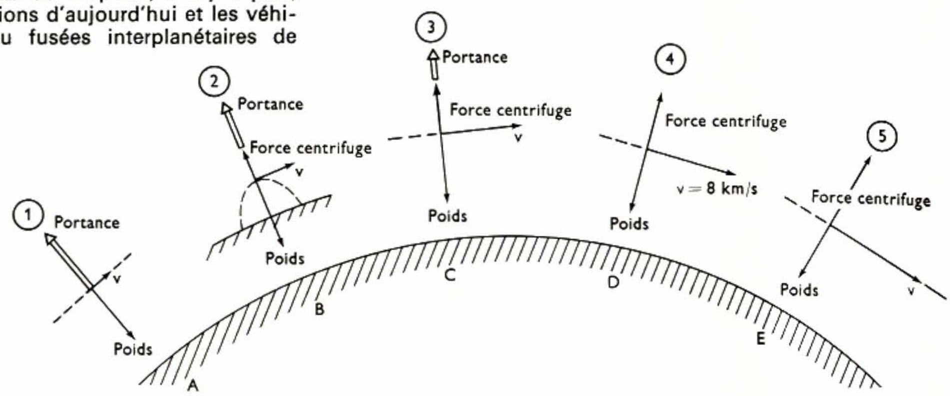
Altitude vraie (kilomètres)	Altitude restituée dans la cabine (kilomètres)	
	Surpression normale	Surpression de combat
0	0	0
2	2	2
4	3	3
6	3	4
8	4,5	5,5
10	5,5	7
12	6,5	8,5

Dans ces avions on voit que l'altitude restituée dans la cabine est trop grande pour qu'on puisse se dispenser d'un inhalateur.

Un éclatement de la cabine à très haute altitude fait courir un tel risque au pilote qu'il devient indispensable, dès 15 000 m, d'utiliser un véritable scaphandre comme vêtement de secours, scaphandre dont la mise au point est très délicate.

3.2.8. Existe-t-il une limite des vitesses aérodynamiques ? — Malgré toutes les difficultés accumulées, l'homme poursuit la conquête de l'espace; il n'y a plus, entre les plus rapides des avions d'aujourd'hui et les véhicules spatiaux, satellites ou fusées interplanétaires de demain, une différence tellement grande. Celle-ci réside seulement dans la manière dont la portance aérodynamique et la force d'inertie centrifuge qui s'exerce sur le mobile tournant autour du globe, s'associent pour équilibrer le poids (fig. XII-27). L'avion lent en vol permanent, à basse vitesse, équilibre son poids par la portance aérodynamique (1).

Fig. XII-27



L'avion rapide d'aujourd'hui peut temporairement, par une trajectoire parabolique à grande vitesse, vaincre la pesanteur à la fois grâce à la portance et à la force d'inertie centrifuge (2). Pendant de courts instants, la force centrifuge peut être suffisante pour équilibrer le poids sans le secours de la portance aérodynamique. Pilote et équipage se trouvent alors dans les conditions de pesanteur nulle; les objets les plus denses « flottent » dans la cabine; l'eau d'un verre que l'on essaye de répandre se concentre en une boule, elle aussi en équilibre.

La vitesse augmentant encore (3) la force centrifuge est suffisante, même en vol permanent et horizontal, pour équilibrer une part importante du poids. Le rôle de la portance aérodynamique devient négligeable.

À la vitesse de 8 km/s, la portance aérodynamique n'est plus nécessaire. La force d'inertie centrifuge équilibre exactement le poids (4). Cette vitesse à laquelle on obtient un équilibre exact est d'autant plus faible que la distance du véhicule à la terre est plus grande, puisque la force d'inertie centrifuge est égale à $\left(m\frac{V^2}{R}\right)$ si l'on appelle V la vitesse, R la distance du mobile au centre de la Terre, et m la masse du mobile.

On comprend donc qu'à partir d'une vitesse de 8 km/s, le décrochage aérodynamique ne vienne plus limiter la possibilité du vol. On se rappelle de plus la constante augmentation de la vitesse de décrochage avec l'altitude, du fait de la diminution de la masse volumique de l'air. Il en résulte la courbe donnant la vitesse inférieure de vol permanent, présentée figure XII-26 (courbe intitulée « décrochage »).

Le domaine de la chaleur est un domaine inaccessible au-delà d'une limite que présente la même figure.

On voit l'étroitesse du « corridor » du vol *permanent*, dans lequel les avions d'aujourd'hui sont encore à peine engagés.

C'est ce corridor que suivront les véhicules de rentrée spatiale qui, dans un avenir peu éloigné, remplaceront les systèmes actuels de rentrée orbitale, à base de rétrofusées et de parachute. Dans ces véhicules pilotables, la portance sera obtenue par la forme particulière du fuselage. Mais peut-on encore parler d'avions ?

4. LES MESURES EN VOL ET DISPOSITIFS D'ESSAIS

Avant la guerre de 1939-1945, la plupart des services d'essais en vol se contentaient des appréciations qualitatives des pilotes d'essai et des relevés effectués par l'équipage en consultant les instruments de vol installés dans l'avion. L'instrument de mesure le plus sophistiqué était alors le barographe à tambour, à stylet inscripteur.

Cette situation était généralement due au fait que la plupart des appareils scientifiques d'alors étaient conçus pour fonctionner en laboratoire et nécessitaient un environnement particulier, généralement exempt des vibrations normalement présentes à bord d'un avion.

C'était un fait bien connu que la plupart des appareils excellents au sol se refusaient obstinément à fonctionner en vol. Cela constituait un tel obstacle au développement des méthodes scientifiques d'essais en vol que la nécessité d'un effort particulier dans ce domaine apparut évident dès 1945.

Un premier pas avait consisté à utiliser une ou plusieurs caméras filmant une horloge et les instruments de bord, dont le fonctionnement était, lui, bien éprouvé. Le dépouillement image par image nécessitait un travail écrasant et un personnel très important. La France qui ne disposait pas de ce personnel et, soucieuse de se doter des moyens de sa renaissance aéronautique, comprit qu'un effort particulier s'imposait. Son *Centre d'essais en vol de Brétigny*, organisme officiel sous la dépendance du ministère de la Défense nationale, entreprit donc les études nécessaires.

Celui-ci fit mettre au point et fabriquer un enregistreur de vol qui, sous un format réduit, permettait d'obtenir sur une bande de papier photographique, les traces représentant les variations en fonction du temps d'une douzaine de paramètres, des pressions transmises à l'enregistreur par des tubes, des positions d'organes représentées par des tensions électriques, des accélérations, etc. L'enregistreur était alimenté électriquement. Une standardisation très poussée permettait d'utiliser des configurations très variées pour les accessoires internes de l'enregistreur, baptisés inscripteurs. Les organes de détection des paramètres, pressions, tensions ou courants électriques, accéléromètres et signaux inscripteurs de « tops » étaient eux normalisés.

Une seule de ces bandes d'enregistrement était d'une richesse scientifique très grande et son interprétation pouvait être faite même par un personnel restreint.

Cette invention eut un succès dépassant très largement les frontières françaises et le nom d'*Hussenot* désigna désormais l'enregistreur de vol proprement dit. Elle assura en tout cas un bon démarrage à l'industrie aéronautique française renaissante qui, maintenant encore, ne peut concevoir d'exécuter d'essais sans l'aide de cet enregistreur ou de ses dérivés fabriqués par différentes firmes françaises. L'ingénieur *Hussenot*, prématurément disparu lors d'un vol d'essai, put seulement voir le début de l'immense succès de son appareil.

Depuis 1945, le goût des ingénieurs d'essais en vol pour les données numériques scientifiques n'a fait que croître; cela impose de prendre en considération la manière d'utiliser

les informations récoltées et le temps nécessaire à ce travail, si possible entre les vols, afin que chacun d'entre eux puisse bénéficier des résultats du vol précédent.

On arrive ainsi à des installations embarquées très complexes, comme celle de *Concorde*, multipliant par mille la productivité scientifique de chaque vol : c'est ainsi que sur les prototypes de cet avion plus de trois mille paramètres sont enregistrés, dont environ deux mille trois cents sous forme numérique, permettant, après chaque vol, une étude rapide de la bande magnétique correspondante par des ordinateurs spécialisés. Inutile de dire que les effectifs d'ingénieurs et d'experts nécessaires pour interpréter ces résultats sont aussi beaucoup plus grands, en dépit de la présentation plus « digeste » de ceux-ci.

Plusieurs types d'enregistrements sont utilisés d'ailleurs, illustrés par l'exemple des prototypes *Concorde :*

— enregistrement magnétique numérique pour les paramètres évoluant lentement (l'enregistreur est dit « quasi statique » ;

— enregistrement magnétique analogique par modulation de fréquence pour les paramètres rapides ;

— enregistreurs graphiques sur bande de papier, disponible immédiatement sans nécessité d'un développement photographique (donc utilisable par l'équipage, à bord de l'avion) ;

— télémesure retransmettant à une station au sol les paramètres les plus importants ou ceux qui permettent à une équipe de spécialistes au sol de contribuer à l'exécution du vol d'essai, au fur et à mesure de cette exécution ;

— enregistreur protégé conservant, en cas d'accident, les données éventuelles du vol.

Outre les enregistreurs de vol, appareils essentiellement passifs, on dispose maintenant à bord d'appareils actifs, permettant d'agir effectivement sur le vol et de réaliser certaines expérimentations particulières.

C'est ainsi que pour mesurer en vol l'amortissement des vibrations structurales, amortissement dont la disparition est à l'origine du phénomène de flottement (V. § 3), il faut créer volontairement ces excitations. Cela peut se faire de différentes façons, souvent combinées (exemple des prototypes *Concorde*) :

— par des masses oscillantes entraînées à différentes fréquences, montées en des points judicieux de la voilure et du fuselage ; chacune de ces masses oscillantes s'appelle un « excitateur harmonique ». La méthode harmonique de mesure des amortissements de structure est due aux travaux de l'O.N.E.R.A. ;

— par la combustion de poudre dans de petites tuyères spéciales, provoquant l'application momentanée sur la structure d'une force importante. Sur les prototypes *Concorde* ces « impulseurs pyrotechniques » sont montés sur les gouvernes ;

— par des sollicitations exercées sur les commandes de vol, soit par le pilote donnant des coups à ces commandes, soit si le système de commande s'y prête, par un dispositif électrique spécial (générateurs d'impulsions) dont l'avantage est de standardiser la forme des sollicitations.

En plus de ces dispositifs, qui peuvent occuper une place très importante dans l'avion, on retrouve souvent sur les avions en essais des dispositifs non actifs destinés à améliorer la précision de certaines mesures comme celles des vitesses : c'est ainsi que l'usage de perches anémométriques spéciales montées seulement sur les prototypes est très répandu, notamment aux États-Unis d'Amérique.

Pour terminer ce très bref exposé il est nécessaire de parler de l'usage des moyens de trajectographie et des radars.

Deux types de mesures de trajectoires sont nécessaires : celles n'intéressant que les phases de décollage et d'atterrissage et celles intéressant les autres phases du vol.

Les premières sont faites à l'aide de cinéthéodolites filmant l'avion et donnant le moyen d'en déterminer la position angulaire. Un minimum de deux postes de cinéthéodolites au sol est nécessaire pour restituer une trajectoire. Toutefois, des études permettent d'espérer, en substituant un rayon laser au rayon lumineux ordinaire, d'obtenir la trajectoire avec un seul poste donnant les coordonnées polaires, la distance, l'azimuth et le gisement.

Les secondes mesures de trajectoire intéressent les étalonnages des dispositifs de mesure de la vitesse de l'avion. Ils permettent de connaître la pression totale, la pression atmosphérique et la température totale. Les erreurs systématiques proviennent généralement de la difficulté de mesurer, à grandes vitesses, la pression atmosphérique dans le champ de pressions très perturbé par l'avion lui-même. La détermination de l'erreur systématique de mesure de la pression atmosphérique par radar s'exécute en deux temps :

Premier temps. — On procède à un étalonnage de l'atmosphère c'est-à-dire que l'on établit la correspondance entre l'altitude géométrique (distance entre le point considéré et le sol, mesurée au radar) et la pression atmosphérique ; cela peut se faire dans l'avion à essayer, à condition de le faire voler à des vitesses assez faibles pour que la mesure de la pression atmosphérique ne soit entachée que de faibles erreurs.

Deuxième temps. — L'avion passe à grande vitesse dans la zone atmosphérique ainsi étalonnée et son altitude est mesurée à quelques mètres près par radar. L'étalonnage atmosphérique précédent qui a donné la pression atmosphérique vraie permet alors la comparaison avec celle mesurée à bord.

Il est évident que ces deux temps doivent être très rapprochés pour que cette méthode soit applicable. L'étalonnage atmosphérique est souvent repris après les passages à grande vitesse. Le radar utilisé est un radar spécialisé pour faire des mesures trajectographiques. En France on utilise fréquemment le radar trajectographique Aquitaine du Centre d'essais des Landes dont l'objectif primaire est de mesurer les trajectoires de départ d'engins balistiques.

L'un des autres usages des radars est d'éviter les collisions entre les avions en essai et les avions de ligne réguliers. Dans ce but a été créé par le Centre d'essais en vol français (C.E.V.), un organisme de contrôle de la Circulation d'essais et de réception (C.E.R.) dont les agents sont des spécialistes des essais en vol, utilisant les radars du C.E.V. ou détachés auprès des contrôles radars militaires et civils et utilisant les mêmes moyens qu'eux.

Grâce à cet organisme le pilote de l'avion en essai est guidé par radio depuis le sol, compte tenu des programmes de l'essai et des possibilités du prototype, sans avoir à s'inquiéter des problèmes de circulation aérienne qui autrement l'occuperaient presque entièrement. Toute son attention peut alors être reportée sur l'essai proprement dit.

5. LES ESSAIS DE NAVIGABILITÉ

5.1. Le certificat de navigabilité. — On dit qu'un avion est « navigable » lorsqu'il présente une sécurité suffisante pour son équipage et les passagers, et qu'il ne constitue pas un danger pour les populations survolées.

Cette notion relativement simple cache une réalité fort complexe que l'on va essayer de dégager.

En effet, la navigabilité dépend beaucoup de l'emploi de l'avion ; on demandera, par exemple, à ce que la structure d'un avion de combat à réaction puisse admettre des accélérations supérieures à 6 ou 7 *g* que peut supporter un pilote revêtu d'une combinaison dite anti-g ; en revanche, les structures des avions de transport ne peuvent dépasser sans risque un facteur de charge de 2 à 3. Il y a donc à considérer autant de « normes de navigabilité », que de types d'avions.

En fait, pour chaque type d'avion il n'existe pas une, mais plusieurs « normes », ce terme englobant tous les critères spécifiques auxquels doivent satisfaire la structure, les systèmes de bord, les qualités de vol, les performances.

Les normes de navigabilité font souvent l'objet de règlements distincts suivant qu'il s'agit d'utilisations militaires ou civiles, et aussi suivant la nation concernée.

Pendant un temps, la France a utilisé la série unique des « normes Air » aussi bien pour les divers types d'avions civils que militaires. Aujourd'hui, pour faciliter la vente de nos avions à notre principal client, les États-Unis d'Amérique, les normes utilisées en France sont les *Federal*

ETAPE : ORLY LGWA
DATE : 3 / 1 / 61
POIDS DECOLLAGE : 106650 kg CENTRAGE : 24 %
QNH ·004 mb/ in. TEMPERATURE 8 °C °F
PISTE 29 VENT 240 / 12 kt

STAB. HOR. 3°	VOLETS 25°
EPR DECOLLAGE 2,66	
100 kt	23,3 secondes
V_1	117 kt
V_R	128 kt
V_2	140 kt
VHS 0°	180 kt
EPR début montée	2,21

Fiche de décollage

Aviation Regulations (FAR) qu'a établies la *Federal Aviation Agency* à Washington.

Cette politique, réaliste lorsqu'il s'agit d'avions construits aussi bien par les États-Unis d'Amérique que par l'Europe, devient impossible à appliquer lorsque l'un des partenaires prend de l'avance : or, c'est le cas avec l'avion de transport supersonique franco-britannique *Concorde*. Les Français et les Anglais ont dû mettre au point un règlement de navigabilité commun applicable à *Concorde*, en vue de lui délivrer un certificat de navigabilité. Les Américains n'ont fait que commencer ce travail pour leur part ; ils vont donc seulement ajouter, au règlement FAR s'appliquant actuellement, des *conditions spéciales*, qui leur ont d'ailleurs été inspirées au cours d'un travail de coopération avec les Français et les Britanniques. Ainsi, *Concorde* devrait recevoir à la fois :

— un certificat de navigabilité (CDN) français, et un CDN britannique correspondant l'un et l'autre au même règlement de navigabilité (Standard TSS franco-britannique) ;

— un certificat de navigabilité américain correspondant au règlement américain FAR 25 assorti de « conditions spéciales ».

Cela ne veut pas dire qu'un même *essai de certification* ne pourra servir à démontrer en même temps la conformité au standard TSS et à la FAR 25. En général, les différence existantes ne nécessitent qu'un petit nombre d'essais complémentaires en vol.

On aurait tort de croire que la délivrance du certificat de navigabilité repose exclusivement sur des essais en vol. En réalité la démonstration de conformité aux exigences d'un règlement de navigabilité est faite :

— par des essais en vol,

— par des essais au sol, notamment essais de résistance structurale,

— par des analyses ou des calculs théoriques,

— par des démonstrations en vol d'endurance représentatives de l'exploration normale de l'avion dans les divers climats où il sera utilisé.

Ce qui suit ne concerne qu'une partie seulement des démonstrations de navigabilité, celles qui s'exécutent par des vols d'essai. On envisagera d'abord l'esprit des règlements de navigabilité, ensuite on parlera des organismes officiels concernés en France par le certificat de navigabilité des avions civils.

5.2. L'esprit des règlements. — Pour le découvrir, le mieux est encore d'ouvrir au hasard une page d'un règlement. On s'aperçoit que reviennent souvent des phrases telles que la suivante, qui décrit le comportement d'un avion lorsqu'à très basse vitesse l'un des moteurs extrêmes est coupé brusquement (essai qui est fait sur tous les avions multimoteurs) : « Pendant le rétablissement de l'avion, l'*avion* ne devra pas prendre une *assiette dangereuse* et le pilote n'aura pas à faire preuve d'une *habileté*, d'une *adresse* ou d'une *vigueur exceptionnelles* pour éviter de perdre de l'altitude et empêcher un changement de cap de plus de 20° avant l'achèvement du rétablissement ». (*Extrait de la FAR part 25, § 149, édition du 1er février 1965.*)

Les termes en italique indiquent nettement que l'avion ne doit pas être dangereux, même entre les mains d'un pilote « ordinaire ».

Les textes définissent par ailleurs un certain nombre de vitesses dites « minimales » ; c'est donc qu'il ne faut pas voler en dessous de ces vitesses et qu'il existe certaines règles d'emploi de l'avion. La navigabilité doit donc être prouvée dans le cas où l'avion est entre les mains d'un pilote, non spécialiste des essais, mais formé pour l'utilisation du type d'avion en question, et obéissant aux règles d'emploi d'un avion en général, et de ce type d'avion en particulier.

Quelques exemples vont montrer en quoi consistent ces règles d'emploi. Ils sont tirés soit des règlements, soit des manuels d'utilisation des avions.

Le tableau ci-dessus reproduit la « fiche de décollage », sorte d'imprimé que les pilotes d'un avion de ligne (DC 8) mettent bien en évidence devant eux, pendant l'envol, après l'avoir rempli en consultant les *manuels de vol*.

On y lit divers paramètres, dont le « poids » au décollage (le mot « poids » est ici employé à la place de masse comme très souvent dans le langage non scientifique), les conditions atmosphériques, qui servent à établir la valeur

EPR (*engine pressure ratio*) qui caractérise la poussée que doivent exercer les réacteurs et les temps et vitesses types.

Le copilote enclenche son chronomètre dès le lâcher des freins (tandis que le pilote maintient l'avion durant son accélération jusqu'à la vitesse d'envol) ; il annonce « 100 nœuds, 22 secondes » ; le décollage peut se poursuivre, puisque l'accélération est plus forte que prévue (23,5 s prévues) ; il annonce « V_1 » quand l'anémomètre indique 117 nœuds ; à partir de ce moment, même si un moteur tombe en panne, *il faut* continuer le décollage ; c'est une règle. « V_R » annonce le copilote. Le pilote tire alors la commande de profondeur et cabre son avion jusqu'à l'assiette de décollage (V_R est la vitesse de « rotation » ou cabrage et il ne *faut pas* cabrer avant V_R). Ensuite, la montée initiale doit se faire à la vitesse V_2 de 140 nœuds.

efforts aux commandes sont trop grands. De plus, le débattement et les efforts sur les commandes trop importants peuvent interdire l'arrondi à l'atterrissage.

La masse totale autorisée au décollage de l'avion n'est pas forcément égale à la masse maximale qu'autorise la structure car d'autres règles d'emploi sont édictées pour permettre à l'avion de décoller même si un moteur vient à tomber en panne au cours de cette manœuvre. Les pentes de montée deviennent alors très faibles ; on exige alors que si la panne survient à une vitesse inférieure à une vitesse critique V_1, l'avion puisse freiner et s'arrêter avant l'extrémité de la piste, et que si la panne survient à une vitesse supérieure à V_1 l'avion puisse continuer son envol et franchir un obstacle de hauteur définie à l'extrémité de piste (11,50 m). La figure XII-28 présente les caractéristiques d'un tel envol pour un Boeing 707.

Il est clair qu'une telle exigence va rendre nécessaire une diminution de la charge de l'avion si la piste est trop courte

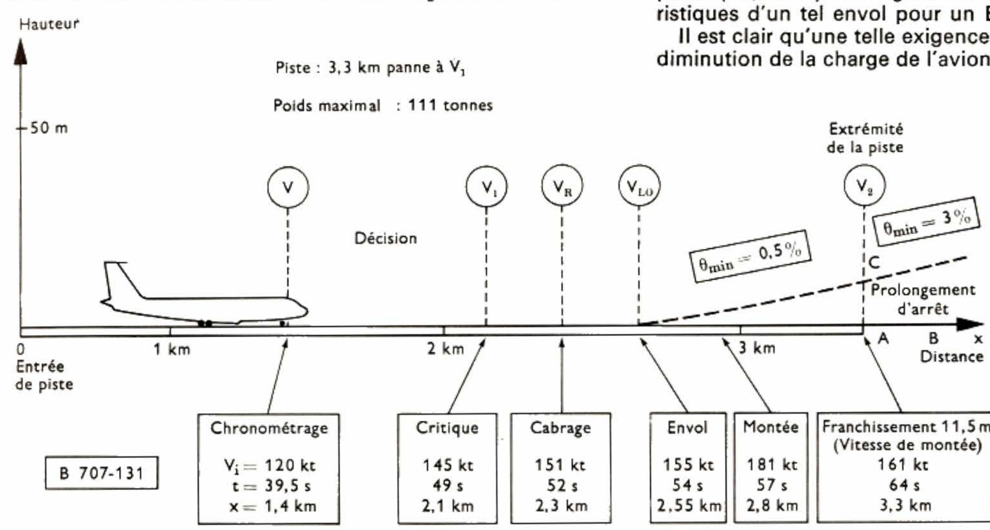


Fig. XII-28

Trajectoire type du décollage d'un Boeing 707-131

Parmi les règles d'emploi, l'une, très importante, concerne les limitations de chargement et de centrage. Non seulement la masse de l'avion ne doit pas excéder une certaine valeur, mais encore la position du centre de gravité doit être fixée entre des limites étroites, ni trop avant, ni trop arrière.

En effet, pour un centrage trop arrière, l'avion est instable statiquement, et les oscillations à longue période (phugoïde) et courte période (oscillation d'incidence) sont divergentes (V. § 2.2) ; le plus grave danger est la divergence de l'oscillation d'incidence que le pilote ne peut maîtriser et qui conduit au décrochage ou à la rupture structurale, et à l'instabilité statique de l'avion en ressource.

Pour un centrage trop avant, l'avion est au contraire hyperstable et sa maniabilité est insuffisante : le débattement normal du manche est alors insuffisant pour permettre un équilibre dans toute la gamme des vitesses utiles et les

pour permettre une « accélération arrêt », ou si la masse est trop grande pour permettre une pente de montée suffisante. Il est clair aussi sur la figure XII-29 que le respect de la vitesse de montée V_2 doit être plus précis pour un avion à réaction comme le Boeing 707 que pour un avion à hélices comme le Boeing 377.

Les manuels de vol doivent donc permettre de déterminer, la masse totale admissible en fonction de la longueur de piste disponible.

Prenons l'exemple du DC 8 :

— pour une piste de 3 060 m, et les conditions ambiantes suivantes : pression atmosphérique = 976 mbar, température = 20 °C, on ne pourra pas admettre au décollage la masse maximale soit 140 tonnes : il faudra se contenter de 136 tonnes. La charge marchande est réduite de 4 tonnes, ce qui est beaucoup pour un parcours transocéanique.

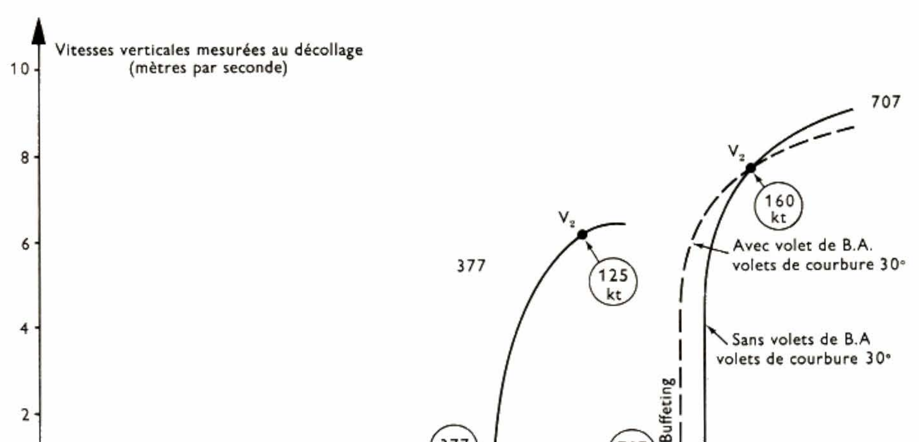


Fig. XII-29

Comparaison des vitesses verticales au décollage d'un avion à hélice (Boeing 377) et à réaction (Boeing 707-131)
B.A. = bord d'attaque

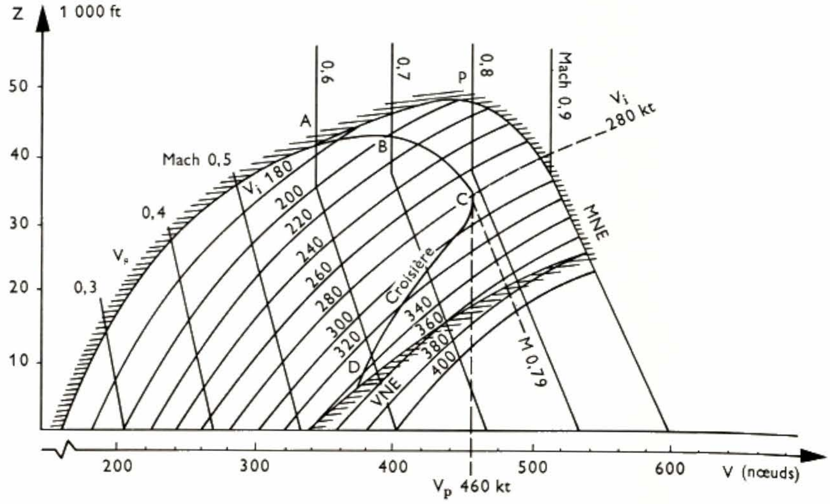


Fig. XII-30

Limites du domaine de vol du Boeing 707 (les limites à basse vitesse correspondent à une masse de 90 tonnes)

La figure XII-30 donne un dernier exemple important de limitation d'emploi, celle qu'impose le domaine de vol; le graphique présente, en abscisses, la vitesse-air, en ordonnées l'altitude. Les courbes isovitesses indiquées sont exprimées en nœuds (unité pratique pour la navigation). On voit sur cette figure, que les basses vitesses sont limitées par le décrochage (vitesse V_s), les grandes vitesses par les phénomènes de compressibilité (MNE) = Mach à Ne pas « Excéder »), par la résistance structurale (VNE = Vitesse à Ne pas « Excéder »). Le point *P* représente le plafond aérodynamique absolu du vol; le point *B* représente le plafond pratique avec les réacteurs au régime de croisière (plafond de propulsion). Le point *C* correspond à la vitesse maximale de croisière.

5.3. Les essais exigés pour l'obtention du certificat de navigabilité. — On a vu qu'aux États-Unis d'Amérique c'est la *Federal Aviation Administration* (FAA) qui délivre les certificats de navigabilité. En Angleterre, c'est l'*Air Registration Board* (ARB) (depuis 1971, l'ARB s'appelle *Civil Air Worthiness Authority* CAA). En France, c'est le secrétariat général à l'Aviation Civile (S.G.A.C.). Toutes les nations membres de l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (O.A.C.I.) se sont engagées à ce que les conditions qu'imposent leurs règlements de navigabilité nationaux soient au moins aussi sévères que celles que définit ou devrait définir l'O.A.C.I.

En fait, il faut bien reconnaître que la tâche de l'O.A.C.I. est très difficile du fait du nombre d'États participants, et les textes approuvés que produit l'O.A.C.I. sont souvent en retard par rapport à la technique; de ce fait, la tendance est de prendre comme référence les règlements de navigabilité de la FAA; cette inféodation est peut être regrettable, mais elle traduit simplement l'écrasante proportion d'avions de ligne construits et achetés aux États-Unis d'Amérique; tout constructeur européen doit donc obtenir, en plus du certificat de navigabilité national, un certificat de navigabilité américain.

Au vu de quelles preuves d'aptitude le secrétariat général à l'Aviation civile ou S.G.A.C. délivre-t-il un certificat de navigabilité (C.D.N.) ? Ce service (qui dépend du ministère des Transports) n'ayant pas de moyens techniques pour vérifier que l'avion obéit aux normes de navigabilité françaises doit sous-traiter cette expertise aux établissements de l'organisme de tutelle de l'industrie aéronautique française: la direction technique des constructions aéronautiques (dépendant du ministère de la Défense nationale) qui dirige:

— le Service technique de l'aéronautique (S.T.A.) qui est responsable de l'organisation, en liaison avec le constructeur, du processus de certification, c'est-à-dire de l'ensemble des travaux permettant de démontrer ou de justifier que la navigabilité de l'avion est suffisante pour l'utilisation commerciale envisagée. Le S.T.A. approuve donc les programmes d'essais *au sol* et *en vol* proposés par le constructeur, organise les réunions, les examens de maquettes ou d'avions, approuve les méthodes acceptables de conformité au règlement;

— le Centre d'essais aérotechnique de Toulouse (C.E.A.T.) qui exécute notamment les *épreuves au sol* de résistance structurale d'ensembles ou d'éléments;

— le Centre d'essais des propulseurs (C.E.P.) de Saclay qui soumet les moteurs aux *essais au sol* correspondants;

— le Centre d'essais en vol (C.E.V.) qui exécute ou fait exécuter les *vols d'essais de certification;* la certification s'inscrivant dans un cadre industriel et commercial astreignant, l'objectif à atteindre (date de certification) et la gestion des moyens correspondants incombent au constructeur, qui présente à l'approbation du C.E.V. le programme d'exécution détaillé.

Au vu de ce programme le C.E.V.:

— choisit les essais qu'il exécutera pour étayer son jugement sur la navigabilité de l'avion (choix susceptible d'évolution en fonction des résultats obtenus);

— cautionne les résultats obtenus en vol par le constructeur.

Quel est, actuellement, le nombre d'heures d'essais en vol nécessaires pour qu'un avion obtienne son C.D.N.? Ce nombre est très important. Voici quelques exemples:

— Vickers VC 10:	1 803 heures
— Boeing 707:	788 heures
— Boeing 727:	1 137 heures
— Boeing 747:	1 444 heures

À ces nombres d'essais il faut ajouter ceux nécessaires pour prouver l'endurance de l'avion dans les conditions d'utilisation normale sur route aérienne; en général le nombre total d'heures de vol avant certification, pour un avion de ligne, est compris entre 1 200 à 2 000 heures, dont 200 à 350 heures d'endurance. Une pratique courante de la FAA est d'exiger 100 heures d'endurance exécutées par le constructeur, plus 100 heures par chaque ligne cliente sur des routes représentatives de son réseau. Cette pratique a été utilisée pour le *Boeing* 747.

L'avion *Caravelle* a été soumis à des épreuves d'endurance beaucoup plus sévères puisqu'elles ont duré 750 heures.

Pour *Concorde* on prévoit 4 000 heures de vol avant certification, dont un millier au moins pour l'endurance, les vols de certification proprement dits devraient représenter 700 à 1 000 heures de vol.

6. LES ESSAIS D'ENVIRONNEMENT

Ces essais consistent à déterminer si l'utilisation des avions n'apporte pas de gêne sensible aux populations survolées. Parmi les facteurs à considérer, le bruit au voisinage des aéroports est sans doute le plus important. Il ne faut pas oublier cependant un autre facteur dont l'influence fait encore l'objet d'âpres controverses: le « bang » provoqué par les avions supersoniques.

6.1. Le bruit au voisinage des aéroports. — La phase du décollage est celle qui provoque le bruit le plus intense parce qu'alors les moteurs délivrent leur poussée maximale tandis que l'avion se trouve au sol ou à proximité de celui-ci.

Autour d'un aérodrome, il existe donc une zone *non aedificandi* dans laquelle ne devra être construite aucune maison d'habitation privée. Toutefois, il ne peut être question d'interdire l'habitat sous l'axe de décollage lorsque la distance à l'aérodrome est déjà importante. Il faut donc protéger les habitants des zones correspondantes par deux moyens :

— réduire le bruit émis par l'avion afin qu'il ne dépasse pas un niveau maximal déterminé, même au régime maximal de ses moteurs ;

— adopter, pour la montée qui suit immédiatement le décollage, une trajectoire et des régimes de moteurs réduisant le bruit tout en restant compatibles avec les exigences de sécurité du vol.

La course aux poussées élevées nécessaires pour décoller des masses de plus en plus grandes est inévitablement accompagnée d'une augmentation du bruit, mais en même temps les sources de bruit évoluent.

Les premiers avions propulsés par réacteurs étaient caractérisés par un bruit de jet prédominant. Les avions subsoniques, de conception actuelle, sont équipés de moteurs double flux (un réacteur et une soufflante canalisée), à faible taux de dilution. Le niveau du bruit du jet est inférieur à celui des avions des générations précédentes, car l'énergie du jet est amputée de la quantité nécessaire à la rotation de la soufflante, et la vitesse d'éjection est plus faible. Le taux de dilution continuant à s'accroître, le bruit du jet continue à diminuer. En revanche, le bruit de l'entrée d'air et du compresseur tend à s'accroître avec l'augmentation des dimensions du compresseur et de la soufflante.

Les niveaux de bruit sont mesurés systématiquement :

— sous la trajectoire de décollage, à 6 500 mètres du lâcher des freins, et latéralement, à 450 mètres de l'axe de décollage, au droit du point de bruit maximal ;

— sous la trajectoire d'atterrissage à 2 000 mètres du seuil de piste.

Pour ces mesures on emploie une unité de niveau de bruit conventionnelle : l'EPN dB (1).

Les mesures relatives à quelques avions actuels donnent les valeurs approximatives suivantes (décollage à pleine poussée) :

Avion	Masse au décollage (tonnes)	Bruit		
		Décollage		Atterrissage
		dans l'axe (6 500 m)	latéral (450 m)	(2 000 m)
Boeing 707 320	135	117	113,5	117,5
Boeing 727	72	101	—	116
DC 8 530	135	119	115,5	117
Caravelle III	45	111	113,5	—
Trident	52	107	107,5	110,5
VC 10	140	111	117,5	115

Tous ces avions satisfont les normes de bruit en vigueur. Mais la tendance actuelle est au renforcement de la sévérité de ces normes, compte tenu des progrès réalisés dans les silencieux et des possibilités de montées plus rapides des avions plus récents, ou en projet (cela leur permet de s'écarter rapidement du sol et l'on remarquera à cet égard l'avantage de l'avion de transport supersonique dont les pentes de montée normales sont plus du double de celles de l'avion subsonique).

Les essais qui permettent de vérifier les niveaux de bruit aux points choisis mettent en jeu un dispositif complexe. En effet, aux emplacements précités, il faut non seulement disposer des microphones et des systèmes d'enregistrement, mais aussi disposer d'un système trajectographique synchronisé avec le précédent, permettant de faire correspondre la position de l'avion dans l'espace et le niveau de bruit enregistré au même instant.

En France, les essais correspondants dits de « certification acoustique » sont exécutés sur la base aérienne d'Istres par le Service technique de la navigation aérienne pour la partie mesure de bruits, en coopération avec le Centre d'essais en vol pour la trajectographie.

(1) Le niveau exprimé en décibels de bruit effectivement perçu (EPN dB) s'obtient à partir des mesures de bruit, par un calcul complexe où intervient l'intervalle de fréquences perceptible par l'homme et la durée du bruit.

6.2. Le bang sonique. — La physique de ce phénomène est maintenant très bien connue grâce aux travaux théoriques effectués en France par l'ingénieur en chef Wanner complétés par les expérimentations menées à bien au Centre d'essais en vol à Istres et les expériences de laboratoire et calculs théoriques de l'Institut franco-allemand de Saint-Louis.

À basse altitude, le survol supersonique des terres habitées est interdit ; il n'est autorisé aux avions militaires français qu'à une altitude supérieure à 10 000 mètres, ce qui a considérablement réduit les inconvénients pouvant en résulter (bris de vitres notamment).

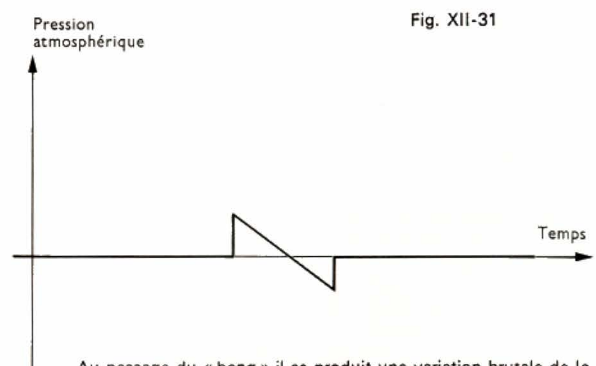
Pour les avions civils de transport supersonique, aucune règle n'existe encore. Certains pays se proposent d'interdire purement et simplement le survol supersonique des avions civils, réservant leur utilisation aux survols transocéaniques. D'autres proposent d'offrir des corridors spéciaux peu habités pour les routes supersoniques transcontinentales.

Pour un individu, chaque survol par un avion croisant à haute altitude à vitesse supersonique peut se traduire par la perception de deux explosions, séparées par un intervalle de temps de 0,1 à 0,3 seconde. Si l'altitude est assez grande, cette double explosion peut passer inaperçue dans le cas de survol d'une grande ville où le bruit est déjà important. En revanche, la nuit, ou dans des campagnes tranquilles, elle peut très bien être perçue. Aux altitudes de survol et dans les conditions de vol prévues pour les avions de transport supersoniques, ces explosions ne devraient pas provoquer de dégâts.

Mais avant d'étudier plus en détail ce phénomène on va le décrire.

En vol horizontal, à vitesse supersonique, l'avion entraîne une sorte de sillage ou « nappe de choc » qui provoque un saut de pression à son passage sur le sol (fig. XII-31).

Fig. XII-31



Au passage du « bang » il se produit une variation brutale de la pression atmosphérique au sol. La courbe a la forme caractéristique de la lettre N lorsque l'avion vole à haute altitude (supérieure à 12 ou 15 km) en palier bien rectiligne. Ordre de grandeur de la surpression : un millième de la pression atmosphérique pour Concorde volant à Mach 2 et 15 km (l'intervalle de temps entre les pics est de l'ordre d'un quart de seconde)

Ce sillage s'étend dans l'espace (il est tridimensionnel) et non pas dans un plan (sensiblement) comme celui d'une péniche. Il affecte l'allure d'un cône d'axe horizontal d'autant plus « replié » sur cet axe que le nombre de Mach est grand.

En fait, cette image du sillage entraîné par l'avion dans son déplacement n'est pas exacte si l'on s'intéresse au processus de formation de la nappe de choc. En effet, tout se passe comme si chacun des « chocs » qui compose la nappe était engendré à un instant donné par l'avion et « tiré » (au sens du tir d'un canon), suivant un angle déterminé par rapport à l'axe horizontal de l'avion : les chocs tirés au point *A* de la figure XII-32 se déplacent à la vitesse du son suivant des « rayons caractéristiques » disposés suivant une sorte de cône ouvert vers l'avant, et dont le demi-angle au sommet est d'autant plus ouvert que le nombre de Mach est plus grand (au contraire de l'angle au sommet du cône de choc).

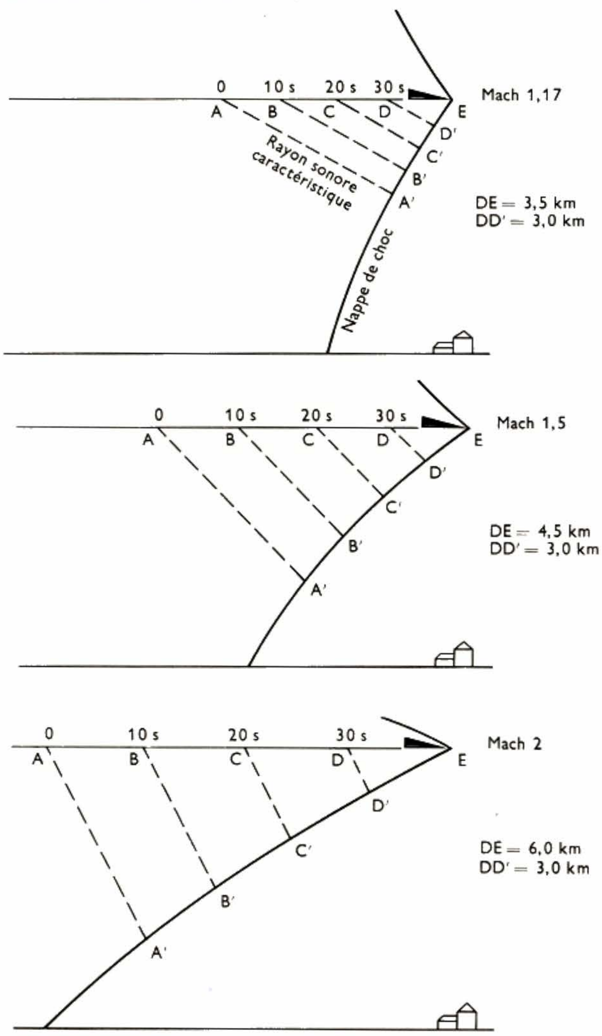
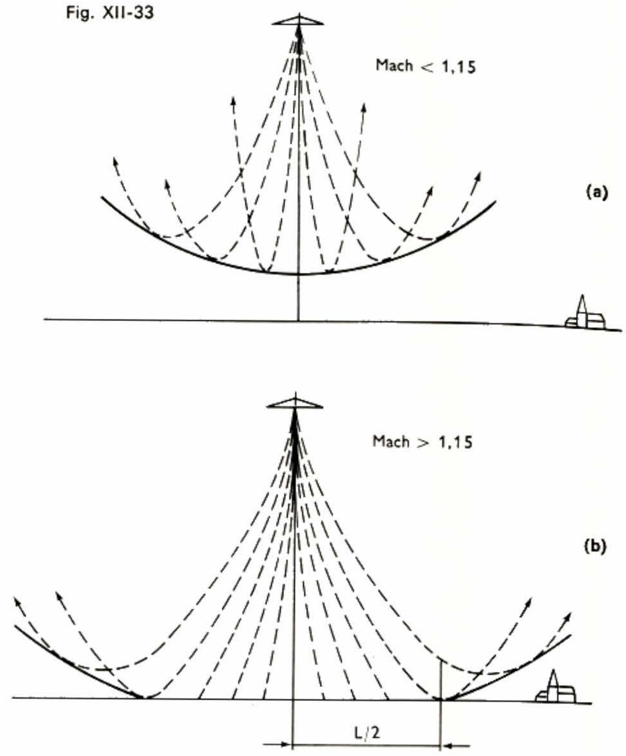


Fig. XII-32 — Le bang sonique

Fig. XII-33



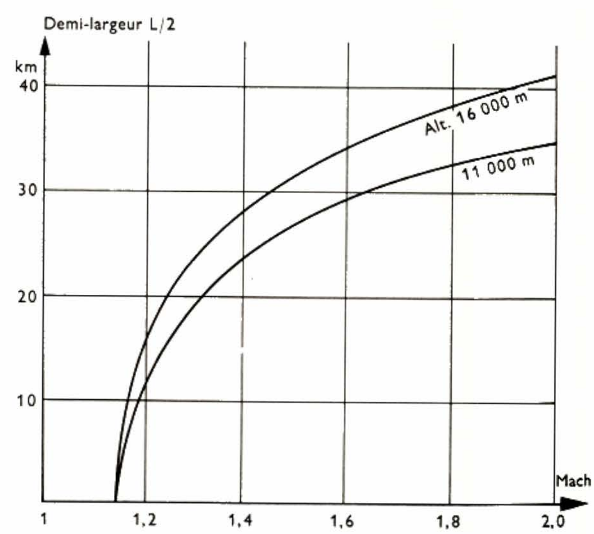


Fig. XII-34 — La largeur du « tapis de bangs » ne dépend pas du type d'avion

Ainsi celui de ces rayons caractéristiques qui se trouve dans le plan vertical de la trajectoire plonge vers le sol avec un angle :

— de 31°7 à Mach 1,17,
— de 41° à Mach 1,5,
— de 60° à Mach 2.

On comprend donc que si brusquement l'avion était détruit au point *C*, cela n'empêcherait pas la partie *A'C'* de la nappe de choc de poursuivre son mouvement et de balayer le sol : en effet, elle a été engendrée durant le trajet de *A* à *C*.

Les rayons caractéristiques plongeant vers le sol sont réfractés par l'atmosphère de plus en plus dense au fur et à mesure de leur descente. Ils ne percutent donc pas le sol si leur inclinaison au départ est faible (fig. XII-33 a, partie supérieure). Or, à faible nombre de Mach ils sont peu inclinés au départ. Il faut donc que l'avion dépasse un certain nombre de Mach dit Mach *de coupure* MC pour que la nappe de choc atteigne le sol. En atmosphère standard, sans vent, au-dessus d'une altitude de 11 km la coupure théorique se fait à Mach 1,15.

Au-delà de ce Mach (fig. XII-33 b, partie médiane), seuls les rayons plongeant fortement atteignent le sol. Les rayons latéraux faiblement inclinés sont, eux, réfractés avant d'atteindre le sol. Le bang sonique ne peut donc être entendu que sur une bande déterminée. La forme des nappes ne dépendant pas de l'intensité des chocs élémentaires émis par l'avion mais des phénomènes de propagation acoustique, la *largeur de la bande ne dépend pas du type d'avion*. Elle est importante (fig. XII-34) : à Mach 2 et à 15 000 mètres elle est de 80 kilomètres. La nappe de choc balaye 3 000 km² par minute.

La description qui vient d'être donnée correspond au vol permanent à vitesse supersonique constante. Mais, pour arriver en supersonique, il faut bien accélérer. Il est donc

intéressant de considérer le cas du passage du subsonique au supersonique. C'est l'objet de la figure XII-35. On va voir que ce passage provoque systématiquement un renforcement du bang, par un processus de « focalisation » :

On a vu que le cône de choc est de plus en plus refermé au fur et à mesure que l'avion accélère : à Mach 1 le demi-angle au sommet est de 90°, à Mach 2 il est de 30°. Il résulte de cela que les nappes de choc se trouvent resserrées au voisinage du sol, au voisinage du point *F* de la figure XII-35. L'examen de la propagation acoustique des chocs dans ce cas montre d'ailleurs que la nappe de choc subit un rebroussement au voisinage de *F*. Les conditions de focalisation multiplient par cinq les surpressions provoquées par les chocs : simplement gênants en vol de croisière à vitesses constantes et haute altitude, les bangs peuvent causer des dégâts matériels même à haute altitude lorsqu'il y a focalisation.

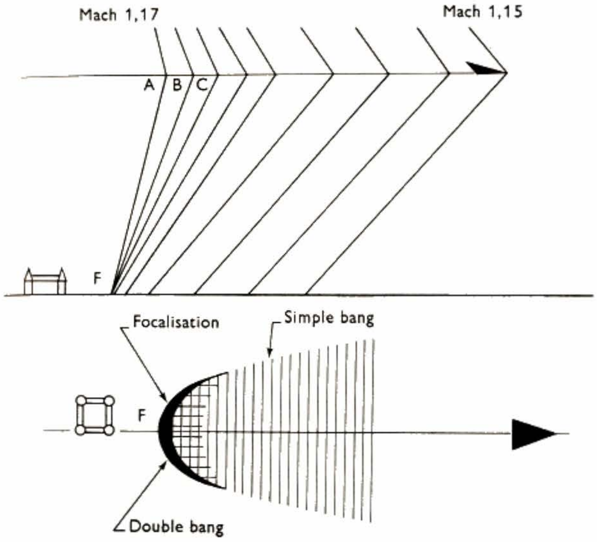


Fig. XII-35 — Le passage du subsonique ou supersonique provoque toujours une focalisation dès que le Mach de coupure est dépassé

La partie inférieure de la figure XII-35 montre la vue en plan des secteurs où le bang est perçu renforcé. Pour un type d'accélération défini, la position géographique de ces zones est fixe sur le sol. Un observateur situé hors des zones hachurées n'entendra rien. Dans les zones hachurées verticalement il entendra un bang (une double détonation) non renforcé. Dans les zones à double hachures il en entendra deux. Sur l'étroite ligne séparant la zone de silence de la zone des doubles bangs il subira un bang renforcé.

À haute altitude, 15 000 mètres, par exemple, la surpression de choc n'est guère que d'un millième de la pression atmosphérique (1 millibar) pour un avion de la dimension de *Concorde* ou du *Tupolev 144*. Ce que représente une telle surpression peut s'imaginer en disant qu'une rafale de vent de 45 km/h exerce sur les structures une surpression de 1 millibar (mais la montée de la surpression est plus abrupte dans le cas du bang).

En accélération à la même altitude, du subsonique au supersonique, la focalisation d'avions du même type est d'environ 5 millibars. Pour imaginer l'effet d'une telle surpression, il faut considérer une rafale de vent de 100 km/h dont la montée serait quasi instantanée : cet effet de percussion s'ajoute à l'effet statique et peut provoquer des dégâts.

Si l'altitude de vol est plus basse, la surpression est en gros augmentée proportionnellement au produit $\sqrt{p_0 p_1}$ où p_0 représente la pression atmosphérique au sol et p_1 celle à l'altitude de vol. On peut ainsi calculer que la même accélération, qui provoquait une surpression de 5 millibars à 15 000 mètres, provoquerait une surpression de 15 millibars si elle était faite au ras du sol. C'est ainsi que lors d'expérimentations faites par le C.E.V. sur la base d'Istres une surpression de 30 millibars a été supportée par un grand nombre de personnes participant à l'expérimentation sans aucune répercussion physiologique, ni à courte ni à longue échéance d'ailleurs. En revanche, 30 millibars sur une vitre de 10 m², cela correspond à une force de 3 000 daN (poids d'une masse de 3 t) sur cette vitre.

Par rapport à ces effets extrêmes les surpressions qui peuvent se produire aux altitudes autorisées pour les vols supersoniques militaires (supérieures à 10 000 mètres) ne peuvent provoquer de dégâts que dans les cas de focalisation.

On a donc recherché quels sont les cas de focalisation. On pouvait se demander si la décélération *en ligne droite* se traduisait, elle aussi, par une focalisation ; il n'en est rien, au contraire les nappes de choc se desserrent en raison de l'ouverture progressive du cône de choc (fig. XII-36).

En revanche, on démontre que les virages ou amorces de virages peuvent provoquer des focalisations s'ils sont

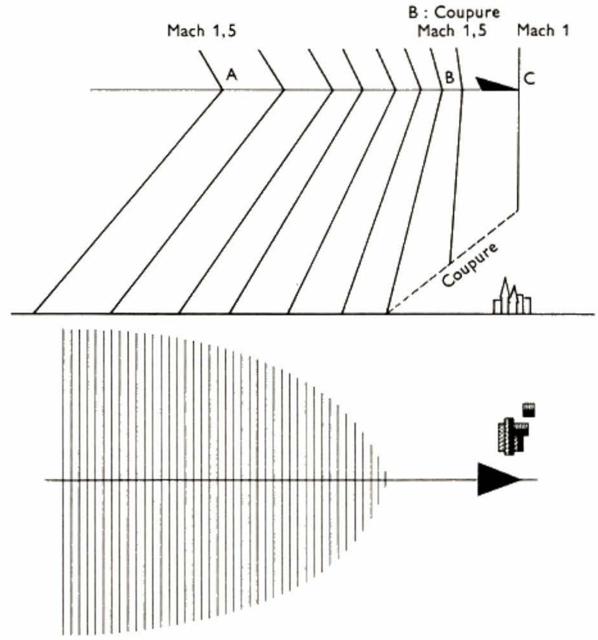


Fig. XII-36 — À la décélération en subsonique il n'y a pas de focalisation, en vol rectiligne

relativement serrés. Pour virer, le pilote incline latéralement l'avion d'un *angle de gîte* qui fixe le rayon du virage. Le fait important est que *plus la vitesse de l'avion est proche de celle du son, plus les risques de focalisation en virage sont grands :* il y a donc moins de restrictions aux virages ou changements de cap à Mach 2 qu'à Mach 1,15.

Nombre de *Mach*	Valeurs approximatives de l'angle de gîte autorisé
1,15	3°
1,3	10°
1,7	15°
2,0	20°

Ce fait est souvent mal compris : par virage il faut entendre toute amorce de virage. Si l'avion suit une route rectiligne, le pilote humain, ou le pilote automatique, réagira dès que le vent ou l'agitation atmosphérique auront provoqué une déviation par rapport à la route choisie, cela par une mise en virage pour rejoindre cette route. Cela est réalisé à un nombre de Mach insuffisamment supersonique et il y aura donc des focalisations.

La plupart des expérimentations opérationnelles militaires concernant les bangs, notamment les expérimentations américaines (Oklahoma City), ont été faites à une

époque où ce fait était ignoré. C'est pourquoi ces expériences n'établissent pas correctement la corrélation entre le niveau moyen des surpressions et les effets sur la population.

C'est la raison pour laquelle, plutôt que d'entreprendre de telles expérimentations, la France a préféré acquérir, en premier lieu, une bonne connaissance du phénomène de propagation acoustique. Cela a permis de découvrir les cas pratiques de focalisation. Il est aujourd'hui incontesté que notre pays a une avance considérable pour les connaissances dans ce domaine.

Cette avance a été obtenue grâce au dispositif de mesures mis en place par le C.E.V. sur la base d'Istres. Ce dispositif est constitué par un axe de mesures de trois kilomètres susceptible de comporter une cinquantaine d'appareils de mesures de surpression. Ces appareils, improprement appelés microphones, sont sensibles aux variations brutales de la pression atmosphérique. Le signal électrique que produit chacun d'eux est enregistré sur bande magnétique. Simultanément le guidage de l'avion et la mesure de sa trajectoire sont faits par radar, afin qu'accélérations et évolutions soient conformes au modèle étudié.

UTILISATION DES MATÉRIELS AÉRONAUTIQUES

CHAPITRE XIII

LE RADAR

1. DÉCOUVERTE ET ÉVOLUTION DU RADAR

Ce sont les nécessités de la défense aérienne qui ont conduit à la mise au point du « radar » (de l'anglais *radio detection and ranging*). Cette appellation a été donnée par les Américains qui, les premiers, organisèrent la recherche en ce domaine et cela à une grande échelle. En français on utilise aussi l'expression détection électromagnétique ou D.E.M.

On appelle D.E.M. l'ensemble des procédés qui permettent de détecter les obstacles autour d'un point fixe ou mobile, d'en donner la position et, dans la mesure du possible, d'en apprécier la forme et la nature. En général, cette détection est réalisée en faisant se réfléchir une onde électromagnétique sur ces obstacles.

Lorsque les avions atteignirent des vitesses comprises entre 500 et 600 km/h et volèrent entre 8 et 10 000 m d'altitude, les moyens de détection tels que le repérage par le son et les projecteurs de grande puissance (la nuit) devinrent peu efficaces. Il a donc fallu trouver le moyen de déceler les avions bien avant le survol du territoire national, afin de pouvoir donner l'alerte et de prendre les mesures appropriées. C'est alors que l'idée exprimée dans certains brevets datant de 1904 fut reprise. Ces textes suggéraient d'organiser la détection et la localisation des engins volants en produisant un rayonnement en direction de ceux-ci et en recueillant le rayonnement réfléchi. La vitesse de propagation du rayonnement étant connue, le temps écoulé entre l'émission et la réception permet de déduire la distance entre le point d'émission et l'obstacle. Il n'était pas possible d'utiliser des ondes sonores à cause de la vitesse des avions ni des ondes lumineuses car elles sont facilement arrêtées. Les ondes électromagnétiques seules semblaient susceptibles de se propager à grande distance, même au travers des nuages, et de permettre une détection efficace de jour comme de nuit. Les expériences faites par la marine américaine en 1920 (interception d'un faisceau d'ondes courtes par le passage d'un navire) et celles réalisées en 1925, en Grande-Bretagne, par Appleton sur la réflexion des ondes courtes par un avion passant à proximité d'un émetteur, encouragèrent les spécialistes à orienter leurs recherches dans ce sens. Cependant, pour recueillir une quantité d'énergie suffisante, il fallait remplir simultanément plusieurs conditions, à savoir :

— utiliser des ondes électromagnétiques de longueurs d'ondes assez faibles par rapport aux dimensions du but,

— rayonner une énergie très importante dans la direction de l'obstacle (ou de l'objet),

— utiliser un récepteur suffisamment sensible pour recueillir et amplifier le très faible signal reçu.

Il fallut attendre 1931 pour que ces conditions fussent techniquement réalisables. Les premiers résultats positifs furent acquis par les États-Unis d'Amérique qui réalisèrent de véritables « barrages » radioélectriques en utilisant des ondes métriques pour déceler le passage d'avions. La France et l'Allemagne suivirent dans cette voie un an plus tard. En 1933, toujours aux États-Unis d'Amérique, Breit et Tuwe mettaient au point la méthode de l'écho pour mesurer la hauteur des couches ionisantes qui entourent la Terre. Cette méthode reçut une application militaire en 1935. Quelques mois plus tard, un Britannique, Wattson-Watt, donnait les premiers plans de radar. En 1936, le paquebot français Normandie recevait un radar de navigation d'une portée de 2 km, destiné à la détection des icebergs. En 1938, la mise au point d'un tube électronique bien adapté à la production d'impulsions électriques puissantes, le magnétron, permettait d'augmenter considérablement la portée des radars. Simultanément, la marine installait les premiers radars sur ses navires de guerre. En 1939, la Grande-Bretagne commençait la construction d'une chaîne de radars d'une portée d'environ 250 km, destinée à la détection d'avions volant à haute altitude (*Chain Home*, dite C.H.) doublée d'une chaîne C.H.L. (*Chain Home Low*) destinée au repérage des avions volant à basse altitude. C'est à partir de 1939 que les radars furent sans cesse développés et perfectionnés. Les stations fixes virent leur puissance augmentée et, par voie de conséquence, leur portée accrue ; les navires reçurent des équipements plus élaborés, les avions furent, eux aussi, équipés de radars ainsi que certains obus (*fusée de proximité*).

Par la suite, le rôle du radar ne fut pas limité au domaine de l'alerte préventive, il permit la détection plus précise des navires par la mise en œuvre d'une télémétrie plus élaborée. De même les avions furent repérés avec plus d'exactitude en distance, en azimut et en site. Les sous-marins furent également équipés de dispositifs similaires. La sensibilité des radars atteignit de telles valeurs que la détection de véhicules terrestres, de troupes et même de nuages de pluie devint possible. Dès la fin de la seconde guerre mondiale, certaines batteries de D.C.A. étaient équipées de radars associés à des servomécanismes pour le pointage automatique des canons vers l'objectif. C'est vers cette période que les Américains mirent au point les premières fusées à guidage automatique d'une portée d'environ 20 km. Depuis, le radar n'a cessé de se perfectionner et il est devenu indispensable, aussi bien dans les domaines terrestre, maritime, aérien, que dans celui de la conquête de l'espace.

2. PRINCIPE DE LA DÉTECTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Le radar est d'abord un projecteur d'ondes électromagnétiques ; tout comme un projecteur lumineux, il permet d'envoyer un faisceau d'ondes dans une direction déterminée (fig. XIII-1). Lorsque le faisceau est intercepté

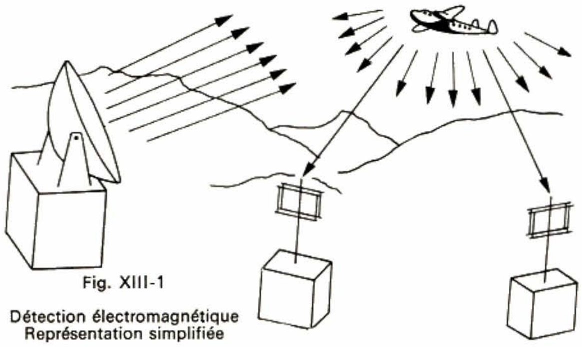


Fig. XIII-1

Détection électromagnétique
Représentation simplifiée

par un obstacle (avion ou navire, par exemple), celui-ci diffuse les ondes comme un avion diffuse la lumière la nuit lorsqu'il se trouve dans le faisceau d'un projecteur. Il faut ensuite détecter l'onde réfléchie par l'obstacle.

Le principe de la détection de la position d'un objet en utilisant le phénomène d'écho n'est pas nouveau : la nature nous en donne un exemple intéressant avec la chauve-souris. Lors de son vol nocturne, elle se guide en émettant des impulsions ultrasonores ; grâce à l'extrême sensibilité de ses oreilles, elle capte les échos dus aux obstacles proches (de 40 cm à 25 m) et suivant l'intensité de ces échos (donc suivant la distance des obstacles) elle peut corriger sa trajectoire de vol.

D'une manière semblable, le radar permet de déterminer non seulement dans quelle direction se trouve un obstacle mais aussi la distance qui le sépare de cet obstacle. Cette mesure se fait de la façon suivante :

— Un émetteur radioélectrique produit une impulsion brève et très puissante qui est ensuite rayonnée dans une direction déterminée par une antenne. Chaque fois que les ondes correspondantes rencontrent un obstacle, elles sont réfléchies (en partie ou en totalité).

— L'antenne utilisée précédemment pour l'émission, sert ensuite pour capter les ondes réfléchies par les obstacles. Elle permet d'obtenir un signal électrique.

— Un récepteur sensible est ensuite employé pour amplifier ce signal et obtenir une image sur un tube cathodique. La distance entre l'obstacle et l'antenne d'émission se déduit du temps mis par les ondes radioélectriques pour effectuer le trajet aller et retour. La vitesse de propagation des ondes étant de 300 000 km/s (300 m en une microseconde), pour mesurer des distances voisines du kilomètre, il faut pouvoir mesurer des temps proches de la microseconde (millionième de seconde). De plus, pour éviter que l'écho ne se confonde avec le signal émis, ce dernier doit être bref, environ une microseconde ; ce signal est une *impulsion*.

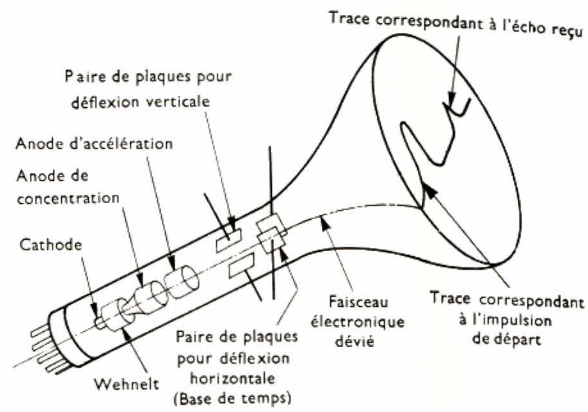


Fig. XIII-2 — Utilisation d'un écho reçu au moyen d'un écran de tube cathodique

La mesure du temps qui s'écoule entre l'émission et la réception de l'écho peut se faire grâce à un oscillographe cathodique sur l'écran duquel on visualise l'impulsion émise et l'impulsion-écho. Même dans sa forme la plus simple ce dispositif peut être utilisé pour afficher directement la distance cherchée. Le balayage horizontal du faisceau cathodique est assuré par une base de temps synchronisée avec la cadence des impulsions émises de telle sorte que le départ de la trace horizontale se fait exactement à l'instant où une impulsion est émise. Le déplacement vertical de ce faisceau dépend de la tension de sortie du récepteur (fig. XIII-2). Sur l'écran apparaît un décrochement vertical en début de balayage, il correspond à l'impulsion émise et, plus à droite, un autre décrochement de plus faible amplitude qui représente l'impulsion-écho. L'amplitude de cette dernière donne une indication sur l'importance de l'obstacle ; la distance entre les deux décrochements verticaux est proportionnelle à celle qui sépare l'émetteur et l'obstacle détecté. Une graduation et un étalonnage adéquat donnent les distances. L'amplitude de l'écho varie avec la direction de l'axe de symétrie de l'antenne : pour obtenir une impulsion qui soit maximale l'antenne doit être dirigée vers l'obstacle.

Cette détection électromagnétique présente de nombreux avantages :

— Les ondes employées traversent le brouillard et la pluie.

— Les portées sont considérables (300 à 500 km).

— Il est possible de pratiquer des mesures télémétriques à partir d'une seule station.

— L'appareil de D.E.M. peut être associé à des servomécanismes pour la poursuite automatique.

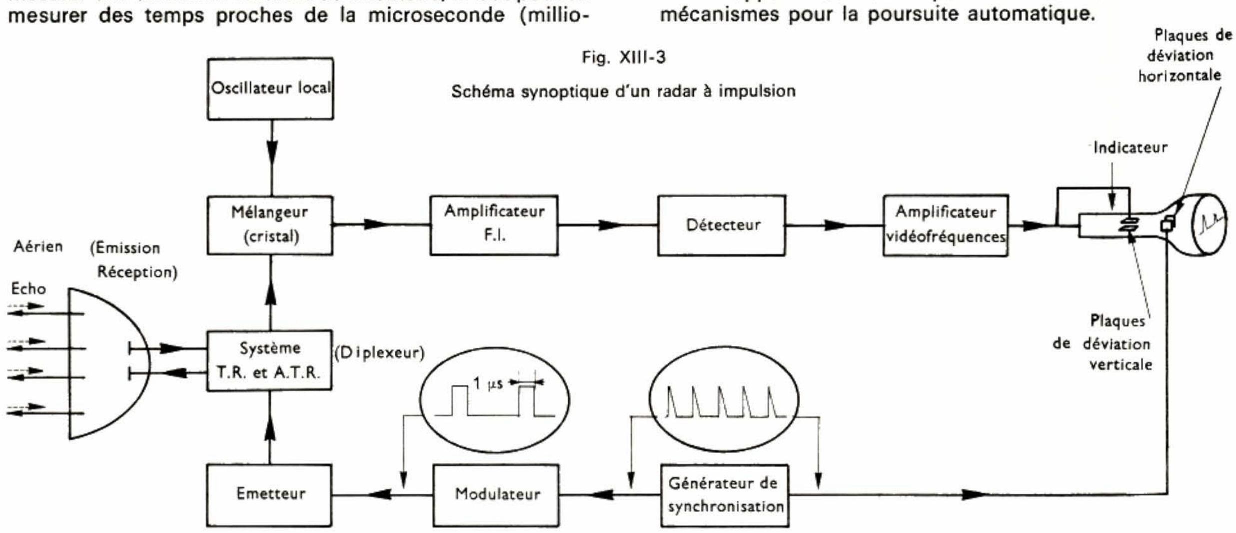


Fig. XIII-3

Schéma synoptique d'un radar à impulsion

3. CONSTITUTION D'UN RADAR

3.1. Partie émission-réception. — D'une façon générale le schéma synoptique d'un radar comporte les éléments indiqués sur la figure XIII-3 (page précédente). Les abréviations T.R. et A.T.R. proviennent des dénominations anglaises *Transmit receive switch* (T.R.) et *Anti-transmit receive switch* (A.T.R.).

3.1.1. Générateur de synchronisation. — Le générateur de synchronisation ou initiateur est un générateur pilote utilisé pour produire des impulsions d'une durée de 1 μs et d'une amplitude de quelques volts, à une fréquence de récurrence convenable (quelques centaines à quelques milliers d'hertz suivant le type de radar). Si les caractéristiques de durée et d'amplitude des impulsions restent les mêmes quel que soit le radar, il n'en est pas de même de la période T (ou de la fréquence) de récurrence. En effet, celle-ci dépend, d'une part, de la portée maximale P_m du radar ($T = \frac{2\,P_m}{c}$; c désignant la vitesse de propagation des ondes : $c = 300\,000$ km/s) et, d'autre part, de la largeur de l'impulsion délivrée par le modulateur. L'intervalle de temps qui sépare deux impulsions est deux mille fois plus grand que la durée des impulsions.

3.1.2. Modulateur. — Le modulateur doit élaborer, à la cadence $F = \frac{1}{T}$, des impulsions à fronts raides, bien calibrées, d'une durée θ de 1 μs par exemple.

Le pouvoir séparateur dans l'axe du radar (c'est-à-dire la distance entre deux obstacles situés sur un même axe passant par l'émetteur, obstacles qui peuvent être distingués) dépend de cette durée θ ; il est donné par la relation suivante :

$$p_{\text{sep}} = \frac{c \cdot \theta}{2}$$

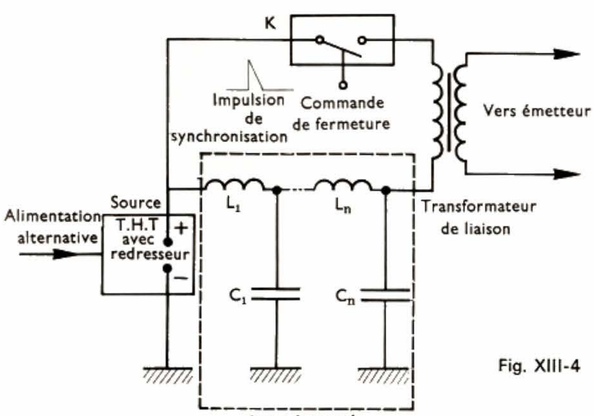


Fig. XIII-4

Schéma simplifié d'un modulateur de radar à impulsions

L'intensité des échos (nuages, sol, etc.) augmente avec cette durée θ. Pour obtenir un tel résultat, il faut pouvoir emmagasiner une énergie suffisante pendant que l'émetteur est bloqué de façon à la restituer en un temps très court. Un exemple de montage utilisé est donné par la figure XIII-4. La ligne à retard se charge sous une d.d.p. élevée pendant que le dispositif qui joue le rôle d'interrupteur K (thyratron, par exemple) est bloqué, c'est-à-dire pendant 99,9 % de la période de récurrence. L'impulsion de synchronisation provoque la fermeture de K et la ligne à retard se décharge à travers K et le primaire du transformateur de liaison avec l'oscillateur de l'émetteur. Il faut noter que la forme de l'impulsion dépend des inductances et des condensateurs formant la ligne à retard et non pas du dispositif interrupteur K.

3.1.3. Émetteur. — L'émetteur comporte un oscillateur qui produit des signaux sinusoïdaux de fréquence très grande, mais son fonctionnement est intermittent car il est commandé par les impulsions délivrées par le modulateur. La fréquence de fonctionnement du radar détermine le type d'oscillateur à employer. En ondes métriques, des triodes permettent d'obtenir des résultats intéressants ; ces tubes doivent fonctionner dans des conditions très particulières et ils peuvent subir des surcharges importantes pendant des durées très brèves. En ondes décimétriques, il faut utiliser des lampes-phares. Pour des longueurs d'onde encore plus courtes, le temps de transit des électrons entre deux électrodes devient important par rapport à la période des oscillations produites et il faut faire appel à des tubes de puissance spéciaux tels que les klystrons ou les magnétrons (fig. XIII-5 et XIII-6). Les différentes bandes de fréquences ainsi couvertes s'étendent de 1 000 à 40 000 MHz. La période de fonctionnement de ces oscillateurs étant très courte par rapport à la période de repos, il n'est pas utile de dimensionner les alimentations des montages en fonction des puissances de crête, qui sont comprises entre quelques centaines et quelques dizaines de milliers de kilowatts. C'est la puissance moyenne mise en jeu (sa valeur est beaucoup plus faible) qui est prise en compte pour choisir les éléments des étages de l'émetteur, sauf ceux du dernier étage qui est prévu pour la puissance de crête.

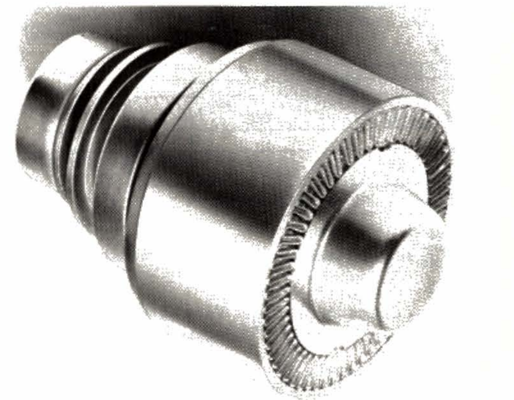


Fig. XIII-5 — Tube VD 1330. Caractéristiques : chauffage : 6,3 V ; 5,4 A ; puissance : 1 800 W ; refroidissement par air ; tension anode-cathode : 3,5 kV ; courant anodique 700 A ; hauteur : 10,6 cm ; diamètre 7,1 cm

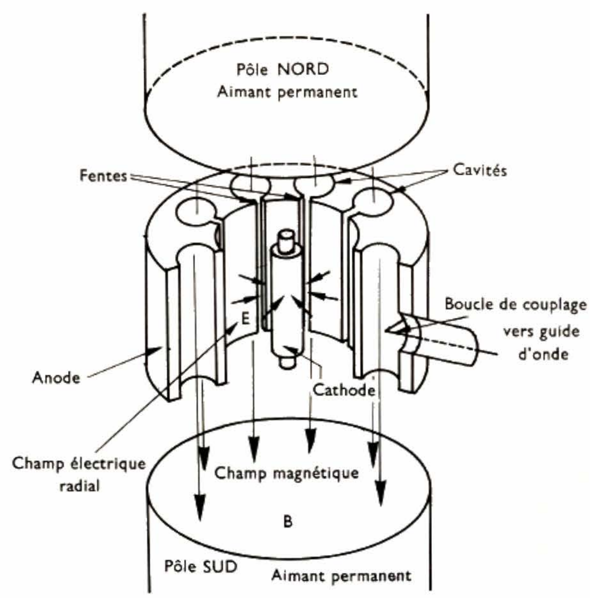


Fig. XIII-6 — Éléments principaux d'un magnétron à cavité

3.1.4. Liaison émetteur-antenne. — L'énergie est transmise à l'aide de câbles coaxiaux ou de guides d'ondes (fig. XIII-7 a et b). Les câbles coaxiaux sont utilisés pour les fréquences les plus basses. L'affaiblissement qu'ils entraînent est supérieur à celui qu'apportent les guides d'ondes qui sont des tubes creux de section rectangulaire ou, plus rarement, circulaire, et dont la face intérieure doit être conductrice. Cependant, un guide d'ondes, ne peut être utilisé qu'avec les fréquences les plus grandes du fait de son mode de fonctionnement. Lorsque la section a la forme d'un rectangle, la longueur de celui-ci doit être égale aux trois quarts de la longueur d'onde du rayonnement transmis à travers le guide; la fréquence de coupure, c'est-à-dire celle au-delà de laquelle le guide ne transmet plus, correspond à une longueur d'onde égale au double de la longueur de ce rectangle.

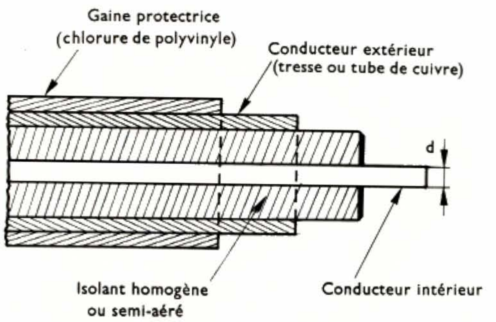


Fig. XIII-7 a — Coupe longitudinale d'une ligne coaxiale à diélectrique solide

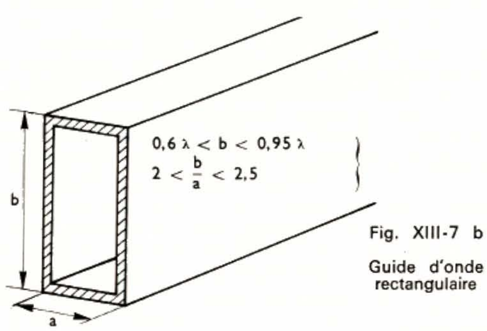


Fig. XIII-7 b
Guide d'onde rectangulaire

Éléments utilisés pour transmettre l'énergie électromagnétique de l'émetteur vers l'antenne

L'utilisation d'une antenne unique exige que le chemin vers le récepteur soit bloqué durant l'émission d'une impulsion, afin que les premiers étages d'amplification du récepteur ne soient pas détruits en recevant une énergie trop grande. Un dispositif approprié permet la commutation de l'émetteur vers l'antenne et de l'antenne vers le récepteur en quelques microsecondes, sans que jamais l'émetteur et le récepteur soient en relation. La solution adoptée est basée sur l'énorme différence d'énergie entre l'impulsion émise et l'impulsion reçue; elle consiste à utiliser des cellules contenant généralement un gaz rare sous une pression très faible. Ce gaz s'ionise au moment de l'émission et, de ce fait, empêche l'énergie de se diriger vers le récepteur (cellule T.R. en parallèle avec le récepteur) tout en permettant sa progression vers l'antenne (cellule A.T.R. en série avec l'émetteur; fig. XIII-8). Pendant la réception, la cellule T.R. ne joue aucun rôle et le récepteur peut recueillir la faible énergie correspondant aux échos, tandis que la cellule A.T.R. isole la branche contenant l'émetteur.

3.1.5. Récepteur. — Tout obstacle renvoie une impulsion qui est de même nature que l'impulsion émise, mais la puissance recueillie par l'antenne est proche du microwatt pour une puissance de plusieurs centaines de kilowatts. L'antenne délivre une tension qui est voisine du microvolt.

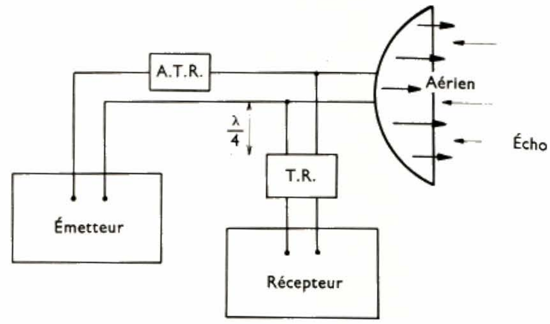


Fig. XIII-8 — Schéma synoptique du système de commutation (duplexeur)

Avant d'être appliquée à un indicateur (V. ci-après), cette tension est amplifiée et transformée. Le signal reçu subit une véritable détection pour être « débarrassé » de la tension hyperfréquence qu'il contient, de façon que seule l'enveloppe de l'impulsion subsiste. C'est ce signal qui est appliqué à un tube à rayons cathodiques (indicateur).

Le récepteur est du type superhétérodyne (V. t. 2, Radioélectricité, chap. 3) ; il comporte généralement un ou plusieurs étages préamplificateurs à haute fréquence de grande sensibilité (amplificateurs paramétriques; V. t. 2, Télécommunications, chap. 2). Le changement de fréquence se fait grâce à un étage mélangeur qui donne un signal à fréquence intermédiaire (F.I.) par mélange du signal reçu et d'un signal fourni par un oscillateur local (ce dernier est généralement un klystron pour les radars fonctionnant sur les ondes centimétriques). La fréquence du signal F.I. est choisie en général dans la gamme comprise entre 10 et 30 MHz. Ce signal est appliqué à un détecteur associé à un filtre qui permet d'éliminer les signaux haute fréquence résiduels. Il reste ensuite à amplifier ce signal avant de l'appliquer sur l'électrode de commande de l'indicateur cathodique. La figure XIII-9 donne les formes d'ondes et les spectres de fréquences correspondants en différents points du récepteur. La figure XIII-10 met en évidence les différents éléments d'une installation complète d'un radar à impulsion.

3.2. Indicateurs. — Les radars permettent de recueillir très vite un très grand nombre de renseignements sur l'azimut, le site et la hauteur d'un objet détecté. Mais pour exploiter ces renseignements sans risque d'erreur, il faut mettre à la disposition de l'opérateur un système de lecture facile. La figure XIII-11 (V. page 868) donne quelques modes de présentation des informations radar. Dans tous les cas les indicateurs sont constitués par des écrans de tube cathodique. La présentation de type A comporte la distance en abscisses et les amplitudes en ordonnées ; elle procure des avantages en ce qui concerne la précision, mais ne permet pas de représenter la portion explorée de l'espace. C'est pourquoi les techniciens ont mis au point différents autres types de balayages de l'écran du tube cathodique de façon à obtenir des déviations proportionnelles aux coordonnées à représenter. En appliquant sur le wehnelt le signal électrique correspondant à l'écho, la présentation des renseignements a pu être rendue très suggestive. Par exemple, la présentation de type B est obtenue en appliquant aux plaques assurant la déviation horizontale un signal proportionnel à l'angle de rotation de l'antenne (à gauche ou à droite de sa position de repos), tandis que le wehnelt et les plaques de déviation verticale reçoivent respectivement le signal de sortie du récepteur et un signal tel que le spot se trouve au bas de l'écran au départ de chaque impulsion et en haut pour le retour d'un écho correspondant au maximum de portée. Pour observer, non plus un secteur, mais tout l'horizon, il faut faire tourner l'antenne d'un mouvement régulier et continu. En synchronisant cette rotation avec un balayage spécial circulaire et en assurant une déviation radiale proportionnelle au retard de l'écho, le résultat obtenu est la représentation dite panoramique (ou type P) ; elle donne les coordonnées

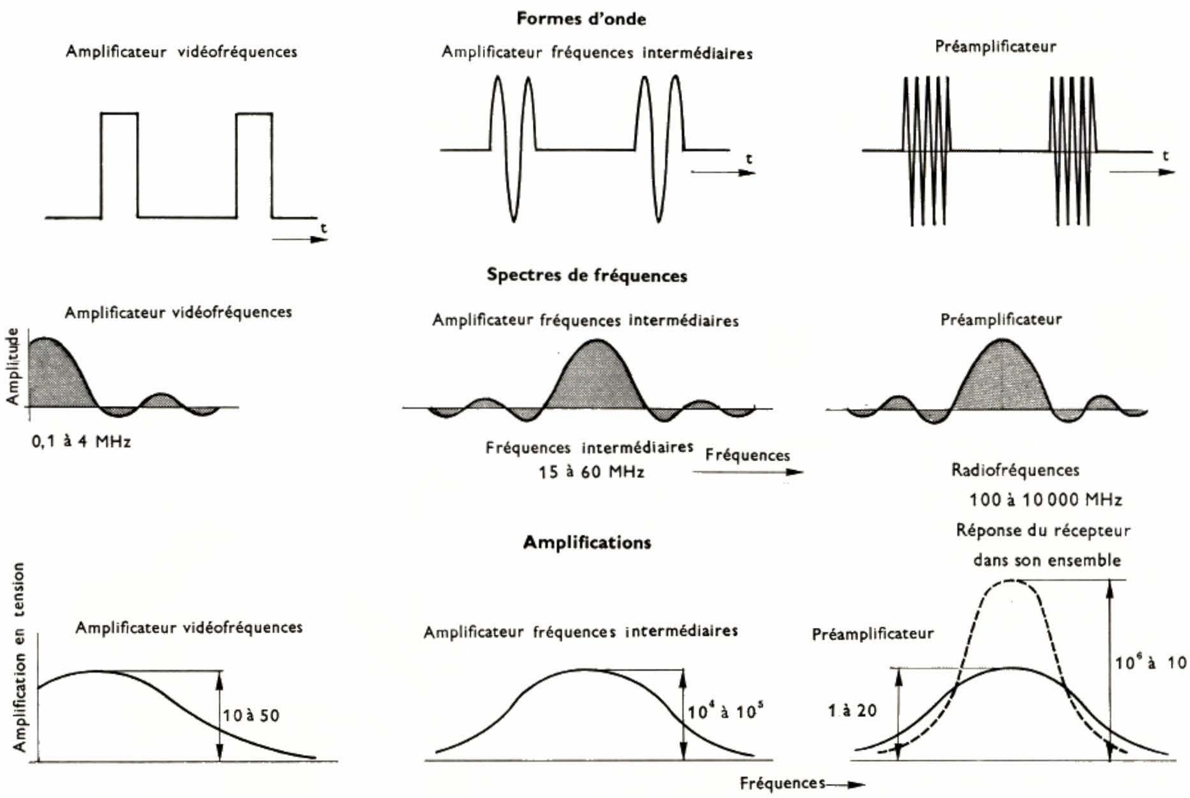


Fig. XIII-9 — Formes d'onde, spectres de fréquences et amplifications

polaires θ et *r* de chacun des obstacles détectés. Le centre de l'écran représente la position relative du radar et par conséquent de l'observateur, par rapport à l'ensemble de ces obstacles. Naturellement, la connaissance simultanée de l'azimut, de la distance et de la hauteur, comme l'exige la navigation aérienne, nécessite une double présentation.

Ce problème semble avoir trouvé une solution dans les radars à trois dimensions (radars utilisés dans le système *Ground Control Approach* ou GCA; V. ci-après). Selon la complexité des présentations à réaliser sur l'écran fluo-

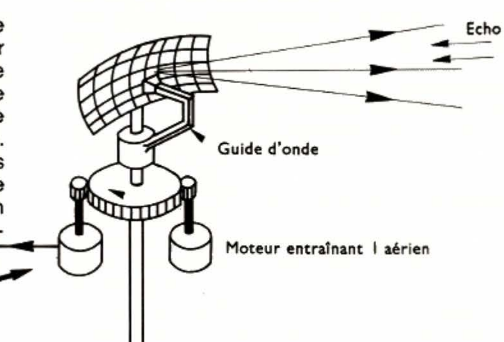
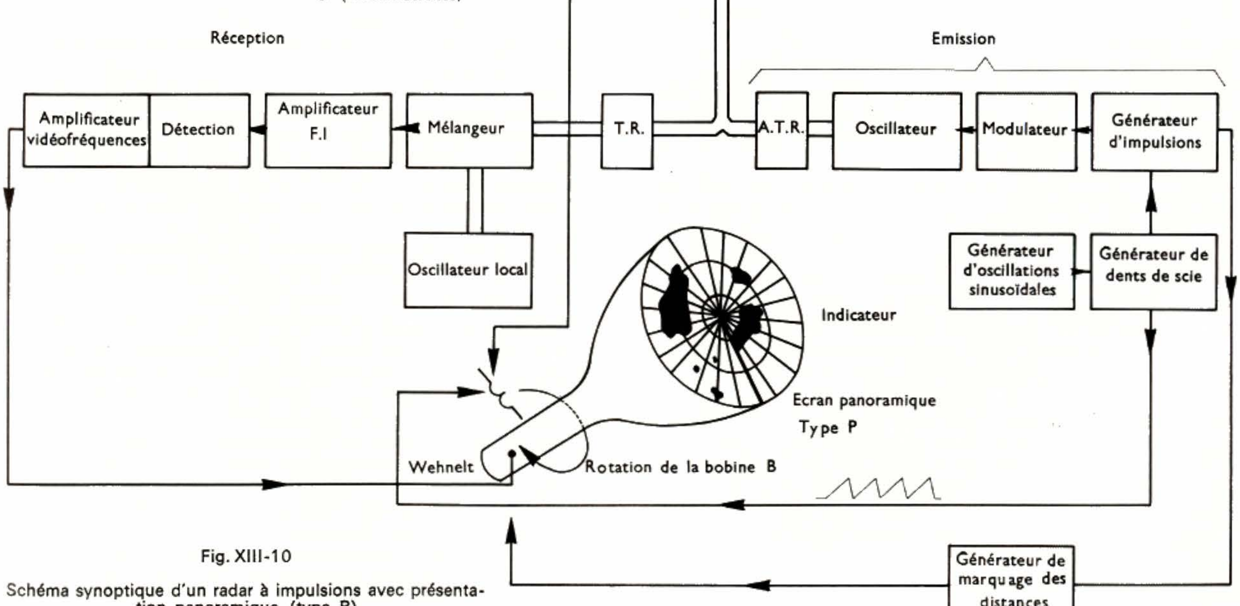



Fig. XIII-10

Schéma synoptique d'un radar à impulsions avec présentation panoramique (type P)

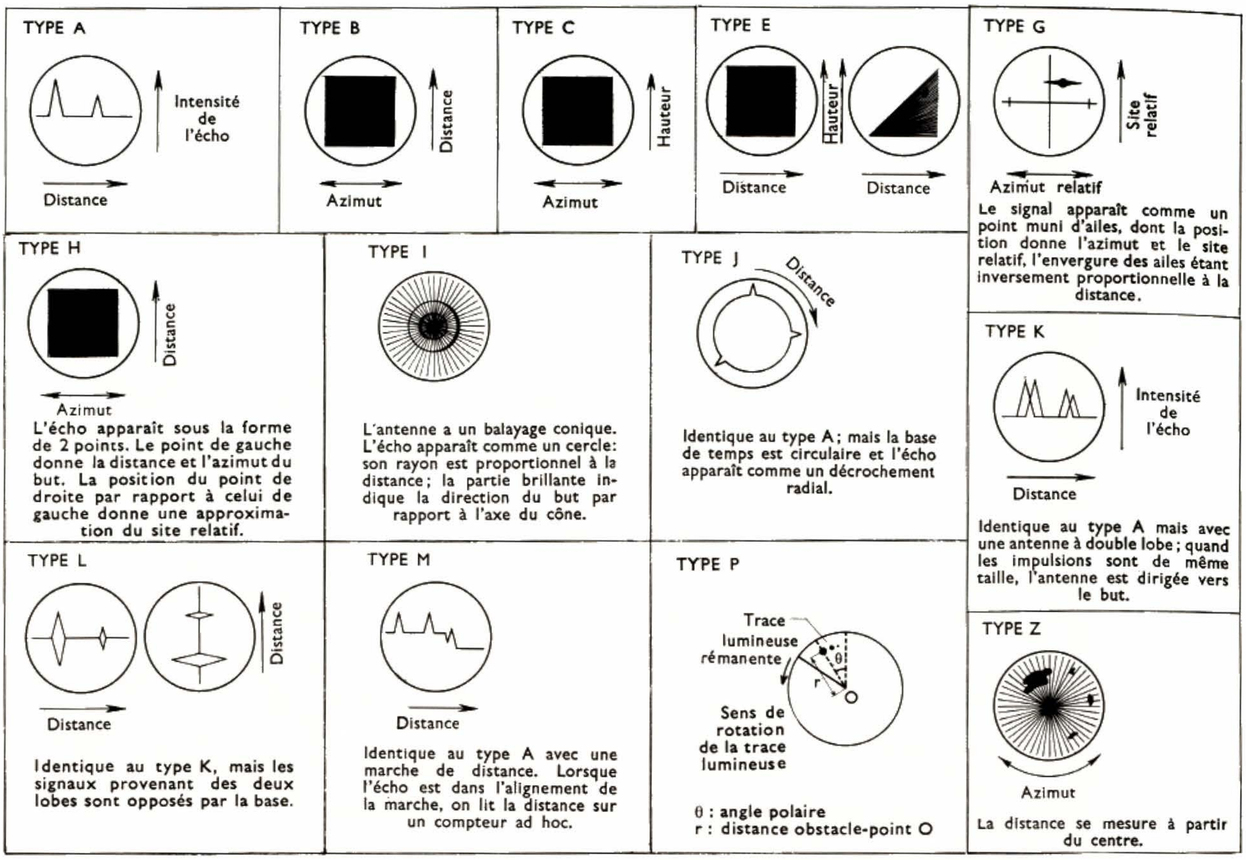


Fig. XIII-11 — Modes de présentation des informations radar (d'après *Principles of Radar, M.I.T.*)

rescent, les constructeurs sont conduits à fabriquer des tubes à rayons cathodiques plus ou moins compliqués. Par exemple, certains tubes comportent trois canons à électrons et reproduisent non seulement des signaux radar, mais des signaux fournis par d'autres appareils tels que des viseurs ou des indicateurs de roulis ou d'assiette (cas des radars d'avions).

Étant donné la grande sensibilité des radars, tous les obstacles importants situés aux alentours de l'antenne produisent des échos non négligeables qui masquent en partie les échos faibles d'objets lointains. C'est le cas des montagnes, des bâtiments, des arbres, des vagues et même des gouttes de pluie (avec des ondes centimétriques). La détermination de la nature des divers échos est donc primordiale et elle peut se faire de diverses façons :

— *en appréciant la différence de durée* entre, d'une part, des échos provenant d'objets à contours bien définis et, d'autre part, d'échos provenant d'objets ou d'obstacles à contours flous (échos superflus) ;

— *en émettant en polarisation circulaire :* les champs électriques de deux ondes émises à deux instants différents n'ont pas la même direction et tout se passe comme si ce champ était animé d'un mouvement circulaire uniforme. Certains obstacles à symétrie circulaire ne modifient pas cette polarisation et il leur correspond des échos qu'il est facile d'éliminer (élimination des échos de pluie) ;

— *en tenant compte du déplacement relatif des objets,* ce qui permet de déterminer s'il s'agit d'un objet fixe ou mobile. En effet, si le radar est fixe et l'objet détecté mobile, la comparaison de deux échos consécutifs, au moyen d'un montage différentiel, donne un résultat non nul ; ce ne serait pas le cas si radar et objet étaient fixes. Ce procédé nécessite la mise en mémoire d'une série d'échos, afin de pouvoir la comparer à la série suivante et d'éliminer ainsi les échos fixes. Divers moyens permettent d'obtenir ce résultat.

● Une ligne à retard peut être utilisée. Nous en rappellerons le principe en prenant l'exemple d'une ligne à retard piézoélectrique. Un premier cristal permet de transformer l'énergie électrique en énergie sonore qui se propage ainsi beaucoup plus lentement ; un autre cristal sert à réaliser la transformation inverse. Les deux cristaux sont placés aux extrémités d'un barreau et le temps de propagation d'un cristal à l'autre est choisi égal au retard cherché.

● Il est également possible de quantifier les échos, c'est-à-dire de leur faire correspondre des nombres qui peuvent être mis en mémoire comme dans un calculateur numérique. Cette mise en mémoire peut être réalisée à l'aide de tubes cathodiques spéciaux permettant d'éliminer les échos indésirables au cours des divers balayages.

Dans le cas où le radar est aéroporté, il y a lieu d'apporter des corrections en fonction de la vitesse de déplacement.

3.3. Antennes. — L'antenne est le dispositif qui rayonne dans l'atmosphère l'énergie radioélectrique produite par l'émetteur (V. t. 2, Télécommunications, chap. 2). Afin de concentrer l'énergie émise dans une direction déterminée et ensuite de capter l'écho avec le meilleur gain et la plus grande précision, les aériens utilisés sont du type « dirigé ».

La plupart des types d'antennes de télécommunications sont utilisables ; toutefois, leur nature et leur forme varient suivant la longueur d'onde utilisée.

3.3.1. En ondes métriques. — Le rayonnement est engendré par des dipôles, ayant généralement une longueur égale à une demi-longueur d'onde ; ils sont alignés devant un réflecteur métallique grillagé (appelé parfois « sommier ») et placés à une distance de ce dernier égale à un quart de la longueur d'onde. Un dipôle horizontal rayonne un champ polarisé horizontalement (c'est-à-dire que le champ électrique de l'onde est horizontal). Plus on développe un aérien dans une direction, plus le faisceau est fin dans cette direction : un aérien de grande longueur donne un faisceau étroit s'étendant dans le sens de la hauteur et un aérien développé en hauteur donne un faisceau très large et de faible épaisseur.

3.3.2. En ondes décimétriques et centimétriques. L'antenne est généralement constituée par une source rayonnant devant un miroir de forme convenable qui constitue la surface rayonnante vibrant en concordance de phase. La source rayonnante est un dipôle, une fente dans un guide d'onde, ou un cornet.

L'utilisation d'un miroir en paraboloïde de révolution excité par un guide à fente permet d'obtenir un faisceau de section circulaire (radars de conduite de tir). Pour obtenir un faisceau large dans le plan vertical et étroit dans le plan horizontal, il faut disposer une série de dipôles excitateurs devant un miroir cylindro-parabolique. Une antenne en cosécante carrée équipe certains radars installés au sol car elle permet d'obtenir un champ électromagnétique d'intensité constante à la surface du sol ou de l'eau, entre la verticale et une certaine distance. Sur des avions situés à une même altitude elle permet des détections de même qualité, quelle que soit la distance dans les limites comprises entre la verticale et la portée maximale.

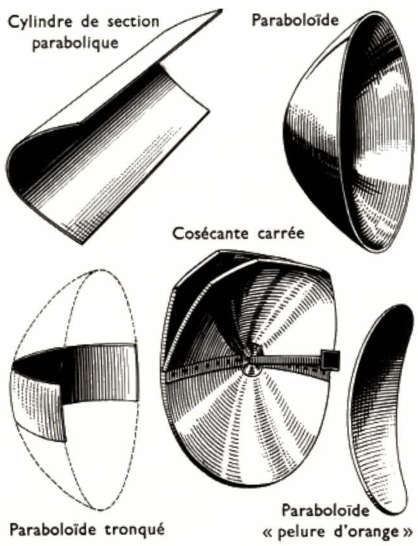


Fig. XIII-12 — Réflecteurs d'antenne divers (*d'après Principles of Radar, M.I.T.*)

La figure XIII-12 donne quelques formes de réflecteurs d'antennes les plus utilisées. Dans le cas fréquent de radars placés à bord de navires ou d'avions, il est nécessaire de munir ces antennes de dispositifs de stabilisation afin de les affranchir, dans une certaine mesure, des mouvements inévitables de la plate-forme.

Remarque : La propagation des ondes électromagnétiques utilisées dans les radars (les fréquences sont supérieures à 100 MHz) est affectée par la courbure de la Terre, la réfraction atmosphérique et par la perte de puissance due à la traversée de précipitations ou de brouillards.

En négligeant l'effet de l'atmosphère, les ondes électromagnétiques se propagent en ligne droite et la courbure de la Terre en limite donc la portée. Pour les radars aéroportés l'effet est presque nul car le rayonnement qu'émettent ces radars traverse les couches de l'atmosphère, sous un angle tel que la réfraction ne se fait pratiquement pas sentir. Pour une antenne de radar placée à une hauteur h au-dessus du sol, la distance géométrique de l'horizon « radar » est donnée par la formule $D = 2{,}53\sqrt{h}$ (D en milles nautiques, h en mètres ; rappelons qu'un mille nautique correspond à 1 852 m).

L'atténuation des ondes radar, du fait des éléments atmosphériques, varie avec la fréquence. Les effets sont importants pour des longueurs d'onde voisines de 1,25 cm. L'atténuation est provoquée par la présence de gouttes d'eau (pluie, nuages) dans l'atmosphère ; elle est aussi due à l'air. Il faut considérer que l'absorption est la plus importante lorsque les diverses particules sont de dimensions très petites comparativement à la longueur d'onde de l'émission radar.

4. DÉTERMINATION DE LA DIRECTION DU BUT

La précision dans la détermination de la position angulaire d'un but dépend de la largeur du faisceau rayonné par l'antenne, et l'indétermination peut être considérée comme étant pratiquement égale à cette largeur. Diverses méthodes sont utilisées pour améliorer cette précision.

4.1. Méthode du double lobe. — Certains radars utilisent la méthode du *double lobe* ou *des faisceaux croisés* (fig. XIII-13). Ce procédé nécessite la production de deux faisceaux radioélectriques et la comparaison des deux signaux reçus. Si les deux échos sont identiques, c'est que le radar est pointé dans la direction passant par

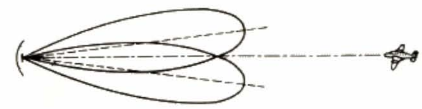


Fig. XIII-13 — Double lobe

le point d'intersection des deux lobes. Si l'objet détecté se trouve légèrement sur la gauche de la direction c'est l'écho, de gauche qui présente la plus grande amplitude. De même, si l'objet se trouve sur la droite de cette direction, c'est l'écho de droite qui a la plus grande amplitude.

Cette méthode permet donc de repérer une direction qui ne coïncide pas avec l'axe de symétrie d'un seul diagramme de directivité, mais qui est à l'intersection de deux lobes. Pour toute autre direction, l'un des deux signaux est prépondérant. La différence est d'autant plus nette que le repérage se fait sur les flancs des deux diagrammes où les variations sont très rapides (et d'ailleurs de sens inverse), ce qui accroît la vitesse de variation du signal correspondant et permet un repérage plus précis. Les deux faisceaux peuvent être émis alternativement. La cadence d'émission doit alors être très grande afin de permettre la comparaison des échos en provenance d'un objet en mouvement rapide. Ils peuvent aussi être émis simultanément de façon à obtenir les deux échos légèrement décalés. Ce procédé permet des précisions de pointage qui peuvent atteindre quelques secondes (précision angulaire). Le radar utilisable pour des mesures aussi précises est connu sous le nom de *radar mono-impulsion.*

4.2. Méthode du balayage conique. — Dans ce système le faisceau rayonné, très étroit, décrit un cône autour de l'axe moyen de l'antenne ; celle-ci est pointée dans la direction du but, lorsque l'écho a la même intensité quelle que soit la position du faisceau au cours de sa révolution (présentation type I). Au contraire, si un dépointage se produit, le cercle figurant l'écho est plus brillant dans la direction du pointage. Le balayage conique est utilisé avec certains radars de tir ou de guidage d'engins. À noter que dans de nombreux radars de tir aéroportés ou d'artillerie, l'antenne se maintient automatiquement dirigée vers le but à l'aide d'un dispositif de *poursuite automatique*. L'antenne est placée dans la direction du but à l'aide d'un système de commande manuelle à distance, puis le dispositif de poursuite automatique est mis en service. Dès ce moment, sans intervention de l'opérateur, l'antenne reste pointée dans la direction du but, quelles que soient les évolutions de ce dernier. Des servomécanismes permettent de corriger automatiquement tout dépointage. Ces dispositifs fournissent de façon continue les coordonnées d'un but. Associés à un calculateur ils permettent de réaliser la télécommande d'installations d'artillerie.

5. PORTÉE D'UN RADAR

5.1. Équation du radar. — La portée d'un radar dépend de la puissance de l'émetteur, du signal minimal détectable par le récepteur, du gain de l'antenne et du pouvoir réfléchissant du but.

La distance maximale $R_{\max}$ de détection est donnée par la formule suivante : $R_{\max} = \left[\dfrac{K \sigma P A^2}{16 \pi^2 S_{\min} \lambda^2}\right]^{\frac{1}{4}}$

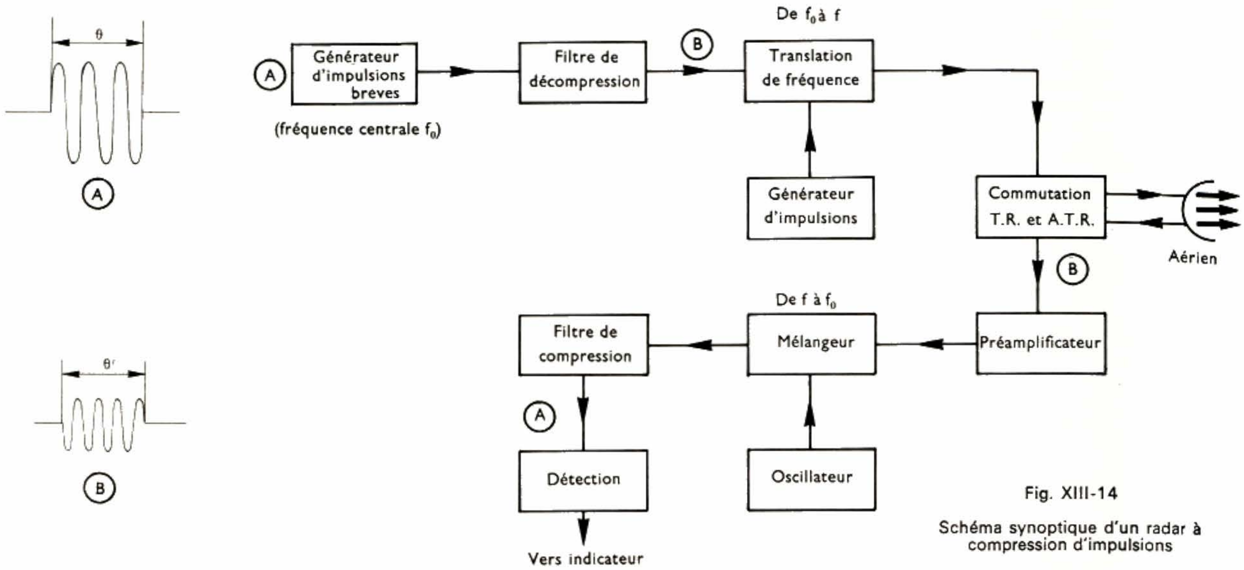


Fig. XIII-14

Schéma synoptique d'un radar à compression d'impulsions

si nous appelons :

P la puissance de crête de l'émetteur,

S_{min} le signal minimal détectable ; c'est la puissance correspondant à l'écho le plus faible qui puisse être séparé du bruit de fond global,

K un coefficient fonction de la catégorie d'antenne utilisée,

λ la longueur d'onde du rayonnement,

A la surface du réflecteur,

σ la surface réfléchissante équivalente du but.

Cette équation montre que dans le cas d'un but de surface équivalente σ déterminée, la portée maximale d'un radar peut être théoriquement doublée en multipliant la puissance d'émission *P* ou la sensibilité du récepteur par 16 (c'est-à-dire en divisant S_{min} par 16). Il est également possible de multiplier la surface *A* du réflecteur de l'antenne par 4 ou encore de diviser la longueur d'onde par 4.

5.2. Radar diversité. — Une augmentation de portée par augmentation de la puissance conduit à des solutions extrêmement coûteuses et de réalisation difficile. Une solution plus simple consiste à émettre des impulsions plus rapprochées en ménageant un intervalle de temps suffisant entre deux échos. L'émission simultanée de deux ondes de longueurs d'onde différentes, les échos étant captés par deux récepteurs distincts dont les signaux de sortie sont additionnés, permet une augmentation de portée d'environ 20 %.

5.3. Radar à compression d'impulsions. — Dans le cas du radar décrit précédemment (dit à modulation d'amplitude) l'augmentation de la durée de l'impulsion entraîne une diminution du pouvoir séparateur en distance. Le principe du radar à compression est fondé essentiellement sur le fait que le pouvoir séparateur dépend du spectre de fréquences de l'onde émise (V. t. 2, Radioélectricité, chap. 1) : plus le spectre est étendu, plus la précision est grande. L'obtention d'un grand pouvoir séparateur nécessitait donc des impulsions de longue durée et occupant un large spectre de fréquences ce qui est tout à fait contradictoire.

La figure XIII-14 donne le schéma synoptique d'un radar à compression d'impulsions. L'impulsion de départ de courte durée θ et de largeur de spectre Δf est appliquée à un filtre dont les caractéristiques sont telles qu'il introduit un déphasage déterminé entre les différentes composantes (qui étaient sensiblement en phase initialement) ; la largeur Δf du spectre ne change pas mais la durée θ' de l'impulsion est supérieure à θ. L'écho recueilli présente une largeur θ' ; il est appliqué à l'entrée d'un filtre de caractéristique inverse du filtre précédent ce qui rétablit les relations de phase initiales, c'est-à-dire une impulsion de largeur θ. Le rapport θ'/θ est appelé rapport de compression ; il peut atteindre plusieurs centaines. Ce procédé permet, à performances identiques, de réduire considérablement les puissances de crête mises en jeu.

6. RÉPONDEUR RADAR — IFF — BALISE RADAR

Afin de connaître la provenance des échos présents sur l'écran radar, tant en ce qui concerne les applications civiles (contrôle de la navigation aérienne) que militaires (IFF, *Identification Friend or Foe*, identification ami ou ennemi), il est nécessaire d'installer un répondeur radar sur le but ami à identifier. Il s'agit d'un ensemble récepteur-émetteur qui, après réception des impulsions d'interrogation émises par le radar, les transmet à l'émetteur qui les code et les réemet vers le radar. Sur l'écran radar cela se traduit par des traits lumineux dont le nombre et l'espacement varient suivant le code choisi ; ces différents traits apparaissent, par exemple, à la suite de l'écho en prenant le centre de l'écran comme origine.

Dans le cas où le répondeur radar transmet ses coordonnées en code, il permet une aide à la navigation et il prend le nom de *balise radar*. Il faut remarquer que la nature même des répondeurs radars (répondeurs actifs) augmente la portée des radars installés au sol.

7. DIFFÉRENTS TYPES DE RADAR

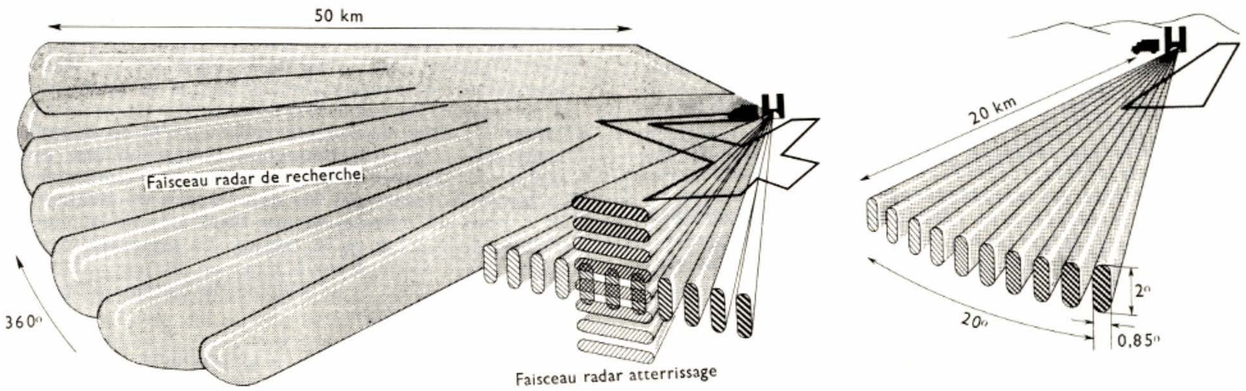
7.1. Radars de navigation de navire. — Ces radars émettent sur des longueurs d'onde de 3 ou 10 cm ; leur portée est comprise entre 20 et 40 milles nautiques (36 à 72 km). Ce sont en général des radars à impulsions. La présentation des résultats se fait sur un écran de type P. Tous les navires de guerre ou de commerce possèdent une telle installation, ce qui leur permet, non seulement de détecter les obstacles, mais aussi de connaître leur position par rapport à la côte et de détecter la présence de grains et de précipitations.

7.2. Radars de veille aérienne. — Ces radars se caractérisent par leur très grande puissance d'émission (plusieurs mégawatts en puissance de crête). De ce fait, leur portée est très grande (300 à 500 km). Comme il s'agit de radars à grande portée, les impulsions émises sont de durée relativement longue (quelques microsecondes). Les longueurs d'onde utilisées sont 25 cm ou 10 cm, et le faisceau rayonné est assez étroit en azimut (2 à 3 degrés) mais plus large en site (10 à 15 degrés). Les renseignements sont fournis sur des écrans de type P ; toutefois, ces écrans ne permettent de représenter qu'un secteur de l'horizon et l'origine du secteur exploré est déplacée vers le bas de l'écran. Ces radars sont principalement utilisés soit au sol, pour la défense aérienne du territoire ou pour le contrôle de la navigation aérienne, soit à bord de bâtiments de guerre pour assurer la protection des forces navales contre tout danger aérien.

Pour déterminer l'altitude des avions il est nécessaire d'adjoindre à ces radars d'autres radars spéciaux qui émettent un faisceau étroit en site et large en azimut ;

ainsi la connaissance de la distance combinée avec celle d'un site précis permet de déterminer l'altitude de l'objet détecté.

7.3. GCA (de l'anglais : *Ground Control Approach*). — Ce sigle désigne un dispositif qui permet l'atterrissage sans visibilité. Il comprend deux radars : l'un est utilisé pour la recherche sur tout l'horizon alors que l'autre couvre le secteur étroit de l'atterrissage (fig. XIII-15). Lorsque le radar de recherche détecte et identifie un avion (4 à 10 milles de la piste), l'opérateur radar guide ce dernier vers la zone d'atterrissage. C'est ensuite le second radar qui permet l'atterrissage sur la piste retenue.



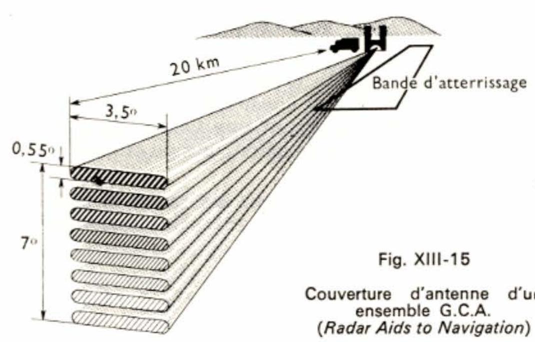


Fig. XIII-15

Couverture d'antenne d'un ensemble G.C.A.
(*Radar Aids to Navigation*)

Le premier radar fonctionne sur une longueur d'onde de 10 cm et sa puissance crête atteint 100 kW ; il fournit un faisceau de longueur 5 degrés en azimut et de hauteur 10 degrés en site.

Le deuxième radar fonctionne sur une longueur d'onde de 3 cm et les deux faisceaux qu'il rayonne assurent des balayages perpendiculaires : balayage de 20° en azimut pour l'un, et de 7° en site pour l'autre.

La présentation des renseignements se fait sur un écran type P pour le radar de recherche et sur deux écrans pour le radar d'atterrissage, un premier écran de type P destiné à assurer l'alignement de l'avion en azimut, et un second écran de type E qui assure le guidage de l'avion en altitude (distance du but en abscisses et hauteur en ordonnées).

La plupart des aérodromes sont dotés de GCA et peuvent assurer ainsi des atterrissages avec visibilité quasi nulle.

7.4. Radars anticollision et météorologiques. — Ces radars très légers sont disposés sur les avions de transport pour éviter certaines collisions ainsi que les perturbations orageuses. Ils fonctionnent sur une longueur d'onde de 3 cm. Une antenne parabolique permet le balayage dans un large secteur à l'avant de l'appareil.

La présentation des renseignements se fait sur un écran de type B qui donne azimut et distance. Un dispositif spécial permet de connaître le site relatif du but détecté. Ces radars peuvent également émettre des impulsions de plus longue durée pour interroger les balises répondeuses.

Les météorologistes utilisent également des radars pour détecter et étudier les masses nuageuses ou encore pour suivre les ballons munis d'un réflecteur métallique léger afin de connaître la direction et la vitesse des vents (radars-vents).

7.5. Radars de bombardement et radars anti-sous-marins. — Ces radars possèdent des antennes qui permettent d'obtenir un faisceau étroit en azimut et assez large en site pour « balayer » la surface du sol ou de la mer, de plusieurs centaines de milles nautiques jusqu'à la verticale. (rappelons que si l'antenne est en cosécante carrée, le champ rayonné présente la même valeur sur toute la surface du sol depuis la verticale jusqu'à la limite de portée de l'antenne).

La longueur d'onde utilisée est de 3 cm, et la présentation des résultats se fait sur des écrans de type P, de grandes dimensions, sur lesquels se dessinent pratiquement les cartes des terrains survolés. Afin de permettre l'analyse des échos, un écran de type A est en général associé à un écran de type P.

7.6. Radars de tir aéroportés. — Lorsqu'un avion intercepteur doit être guidé vers un but déterminé, l'opération est exécutée en relation avec un radar au sol. Pour la fin d'approche et pour le tir sans voir le but, les intercepteurs modernes sont équipés de radars de tir. Le faisceau d'ondes est émis uniquement vers l'avant de l'appareil et le radar est tout d'abord utilisé en recherche avec présentation sur un écran de type B, ce qui fournit ainsi azimut et distance. Dès que l'objectif est en vue, le pilote encadre le but sur l'écran avec des repères lumineux mobiles et fait passer le radar en position de poursuite automatique ; simultanément la présentation se fait suivant le type J.

En fait, la plupart des radars de tir sont dotés de calculateurs qui permettent d'introduire des corrections balistiques fonction des armes et, surtout, de tenir compte des évolution relatives du but et de l'avion pour permettre des interceptions non seulement par l'arrière du but, mais surtout par le travers et même à la verticale. L'action du calculateur se traduit par un déplacement de l'écho sur l'écran ; lorsque l'écho se trouve au centre de l'écran, l'interception est réalisable.

Notons que le guidage des engins air-air se fait en utilisant des radars dérivés du système précédent. Par exemple, le radar peut suivre simultanément le but et l'engin, tandis que les coordonnées correspondantes sont introduites dans un calculateur qui élabore des ordres destinés à l'engin dont la trajectoire peut être modifiée afin qu'il se dirige vers le but. Certains systèmes de guidage d'engins air-air comportent un radar qui reste pointé constamment vers le but, l'engin se guidant automatiquement sur l'axe électromagnétique ainsi créé.

7.7. Radars Doppler. — Le radar Doppler est en fait un équipement de navigation qui permet de connaître à tout instant la position de l'avion ou de l'hélicoptère qui le porte par la mesure de la vitesse au-dessus du sol.

Cet appareil est basé sur l'effet Doppler : lorsqu'un observateur se déplace par rapport à une source de rayonnement de fréquence déterminée (ou inversement), la fréquence mesurée par l'observateur varie d'une quantité qui

dépend de la vitesse relative de l'observateur par rapport à la source. L'émission d'ondes radioélectriques à partir d'un avion en direction du sol donne lieu à un écho après réflexion sur la surface de la Terre et la différence entre la fréquence de l'onde émise et celle de l'onde réfléchie donne la possibilité de connaître la vitesse par rapport au sol. En effet, pour un faisceau radioélectrique dirigé vers le sol et faisant un angle θ par rapport à la ligne de vol, la composante de la vitesse dans la direction du faisceau étant $v \cos \theta$, la différence des fréquences du signal incident (f_i) et du signal reçu (f_r) est égale à :

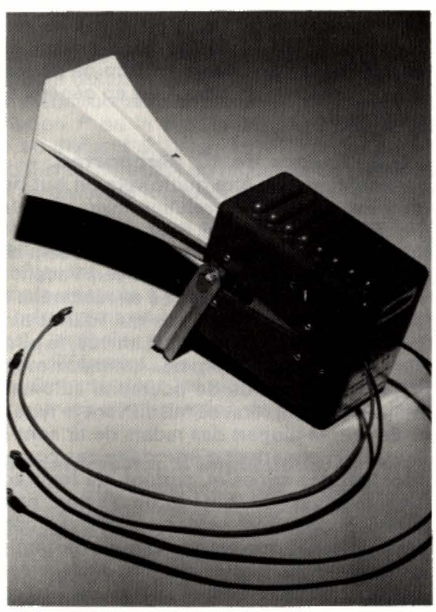
$$f_d = f_i - f_r \approx \frac{2\, v \cos \theta}{c}$$

La détermination de cette différence f_d (appelée aussi *fréquence différentielle*) permet de connaître v.

Par exemple, si $\theta = 60°$ $\left(\cos \theta = \frac{1}{2}\right)$ et si $v = 1\,100$ km/h, la différence f_d est voisine de 10 kHz si la fréquence incidente $f_i = 10^{10}$ Hz ($\lambda = 3$ cm).

Un seul faisceau émis en avant de l'avion ne permet de mesurer que la vitesse selon l'axe de l'avion. Pour apprécier la dérive latérale, le radar Doppler émet aussi deux faisceaux perpendiculaires à l'axe de l'avion. Ce dispositif associé à un compas qui donne un cap précis constitue un calculateur de navigation complet. La précision de l'ensemble est surtout limitée par celle du compas.

À noter que certains composants électroniques tels que les diodes Gunn (V. t. 1, Électronique, chap. 21) permettent la réalisation de radars de surveillance miniatures dans lesquels on utilise également l'effet Doppler. Les applications de ces radars sont fort nombreuses : contrôle de trafic routier, contrôle d'approche de zones dangereuses telles que passages à niveau ou pont-levis, surveillance des zones situées à l'avant ou à l'arrière de gros véhicules en mouvement ; ouverture et fermeture automatique de portes de garages par télécommande, etc.



Radar à diode Gunn ($M + H$—*R.T.C.*)

8. APPLICATIONS DIVERSES DES RADARS

8.1. Altimètre électronique. — La détection d'un obstacle proche peut être obtenue en utilisant un radar dont le principe de fonctionnement est différent de celui des radars à impulsions. Dans ce cas, l'émission se fait de façon continue, c'est-à-dire en ondes entretenues, mais à fréquence variable (fréquence dite glissante) afin qu'à un instant déterminé les signaux reçus soient différents des signaux émis. En effet, si la loi de variation de la fréquence des oscillations émises en fonction du temps est celle indiquée par la figure XIII-16, il est clair que si l'onde émise

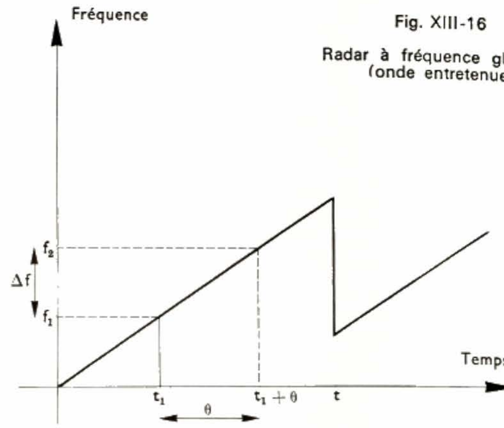


Fig. XIII-16
Radar à fréquence glissante (onde entretenue)

à l'instant t_1 (fréquence f_1) revient au point de départ, à l'instant ($t_1 + \theta$), la fréquence d'émission est alors $f_2 = f_1 + \Delta f$; Δf est d'autant plus grand que le retard θ est plus grand. En envoyant les deux ondes de fréquences f_1 et f_2 dans un détecteur il est très facile de mettre en évidence l'écart Δf et de le mesurer. Le signal élaboré est amplifié avant d'être envoyé dans un fréquencemètre à lecture directe. C'est là le principe de certains altimètres utilisés en aéronautique.

8.2. Fusée de proximité. — Le problème fondamental qui se pose pour l'artillerie anti-aérienne (D.C.A.) est de faire exploser un projectile quand il passe au voisinage d'un avion, donc sans qu'il y ait contact avec celui-ci. Pour cela, la fusée est munie d'un minuscule radar Doppler. Si la vitesse du projectile est supérieure à celle de l'objet visé, la fréquence différentielle f_d traduit la variation de la vitesse de rapprochement. Par construction un relais sélectif est actionné dès que f_d atteint une valeur déterminée ; cela permet de commander le détonateur du projectile.

8.3. Télémétrie. — Dans les radars à impulsions la mesure de la distance entre le radar et le but se déduit de celle

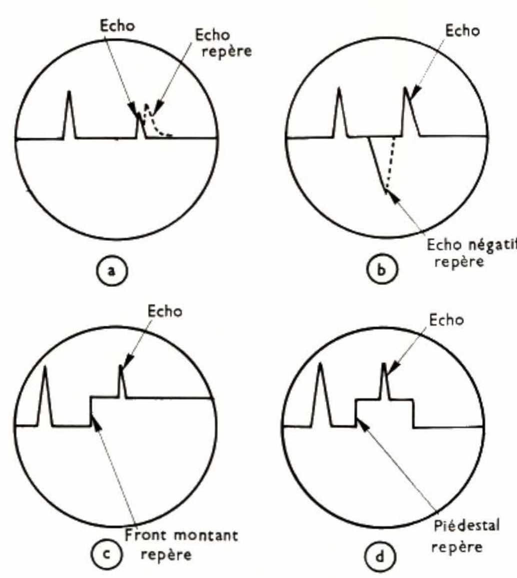


Fig. XIII-17 — Amélioration de la précision dans la mesure des distances par création des échos-repères

de l'intervalle de temps écoulé entre le départ de l'impulsion et le retour de l'écho. La précision de lecture est liée à la largeur des impulsions, aux dimensions de l'écran et à la régularité de la vitesse de balayage du faisceau électronique du tube cathodique utilisé. Ce principe est utilisé en télémétrie mais l'axe horizontal de l'écran est alors étalonné avec précision en faisant apparaître sur l'écran différents types d'échos artificiels qui peuvent être amenés en coïnci-

dence avec l'écho reçu (V. fig. XIII-17). Certains radars permettent d'obtenir des précisions de quelques mètres pour des distances de plus de 1 000 km.

8.4. Contrôle de la navigation aérienne et défense aérienne. — Le contrôle de la navigation aérienne dans une région encombrée, la défense aérienne d'un territoire ou d'une force navale nécessitent l'utilisation simultanée de nombreux radars. Tous les renseignements fournis par ces derniers doivent être combinés et exploités au mieux en fonction du but fixé. Par exemple, la défense aérienne d'un territoire se fait par l'intermédiaire de stations maîtres radars très puissantes dont les zones de détection se recoupent largement, et de radars mobiles, plus petits, utilisés pour couvrir les zones où, pour des raisons dues principalement au relief, les stations maîtres radars sont inopérantes. La quantité importante des renseignements fournis permet de choisir l'instant et le lieu de décollage des avions intercepteurs et aussi d'élaborer les indications de guidage. Tout cela ne laisse que peu de place à l'intuition et une certaine automatisation est indispensable. Des résultats intéressants ont été obtenus avec le système américain SAGE (*Semi Automatic Ground Equipment*). Ce système présente les particularités suivantes :

— la définition du caractère ami ou ennemi des échos se fait par interrogation automatique et par confrontation automatique des positions des échos avec celles qui résultent des plans de vol ou des ordres de mission déposés par les avions amis avant leur décollage ;

— le choix des engins à intercepter en fonction du danger qu'ils présentent de par leur direction et leur importance, est fait par des calculateurs ;

— le dispositif peut ainsi indiquer quels sont les intercepteurs qui doivent intervenir, et à quel moment ;

— les ordres à donner aux pilotes apparaissent sur des indicateurs et l'officier d'interception au sol les transmet par radiotéléphonie aux pilotes (ces ordres peuvent aussi apparaîtrent sur des dispositifs de téléaffichage automatique ou des indicateurs installés sur le tableau de bord de chacun des intercepteurs) ;

— les ordres de retour à la base sont donnés suivant un processus identique.

Parallèlement à certains dispositifs à grande échelle, des systèmes analogues, mais plus réduits, ont été dévéloppés pour l'équipement des armées de terre et de la marine. L'armée de terre utilise des systèmes de défense aérienne tout temps (avec missiles sol-air basse altitude), avec radars assurant simultanément les fonctions veille et poursuite. Par exemple, le système Crotale comporte deux véhicules automoteurs ; l'un constitue l'unité de veille et de désignation d'objectif, l'autre constitue l'unité de tir. Chaque unité de veille peut être associée à plusieurs unités de tir, ce qui assure une grande souplesse au système. Le radar de veille permet une détection pratiquement instantanée de tout écho mobile et comme la précision en gisement de la désignation de l'objectif est adaptée à celle du radar de poursuite, ce dernier est seulement utilisé pour la recherche en site et en distance. Cela assure un gain de temps appréciable et réduit ainsi le temps d'acquisition des données par le calculateur qui est associé au radar. Comme le temps qui s'écoule entre la première détection de la cible et son interception doit être extrêmement court, ce système tient compte de l'asservissement unité de tir-unité de veille, du temps de vol du missile, de la puissance de feu instantanée, de la portée minimale et aussi de la possibilité de répétition immédiate du tir sur la cible.

Les forces navales comportent des porte-avions et des bâtiments plus légers, les frégates, pour la défense contre les attaques des sous-marins et contre les attaques aériennes. À cet effet, les frégates d'escorte sont équipées, en plus de l'artillerie conventionnelle, de rampes de missiles autoguidés ou téléguidés, pour l'interception des avions supersoniques jusqu'à une distance d'environ 40 km. Par exemple, le système d'armes Masurca comporte :

— un radar de veille tridimensionnel constitué par un radar panoramique dans lequel la couverture en site est obtenue en utilisant une succession de pinceaux étroits en site et superposés les uns aux autres dans un même plan vertical. Une comparaison des signaux reçus dans deux pinceaux (comparaison mono-impulsion) permet de déterminer la position en site de la cible considérée ;

— un dispositif extracteur-calculateur automatique pour l'exploitation des informations radar, c'est-à-dire la désignation d'objectif et l'évaluation de la menace ;

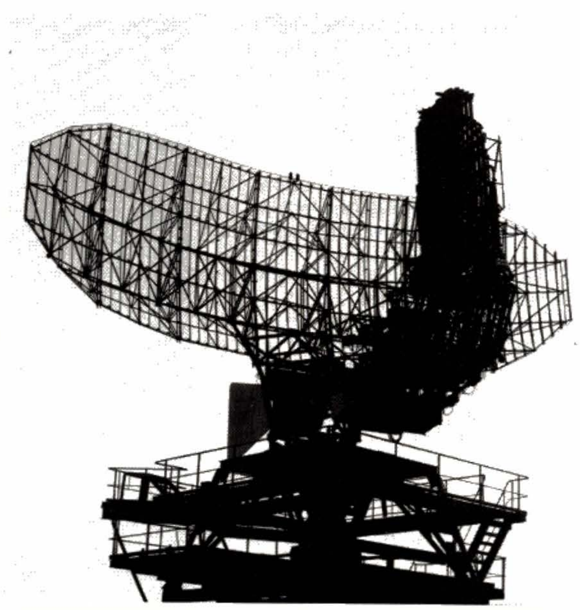
— des télépointeurs couplés à un radar de poursuite pour le guidage des missiles téléguidés ;

— une rampe de lancement équipée de missiles.

Si les divers perfectionnements du radar sont issus des exigences militaires, il existe de nombreuses applications civiles. En effet, l'utilisation de radars est courante pour le contrôle de la circulation aérienne. Ils sont utilisés pour calculer le cap à suivre pour aller d'un point à un autre ; pour détecter les risques de collision et par conséquent choisir les routes qui permettent de les éviter, pour définir des altitudes optimales de vol, compte tenu des consommations de combustible en fonction de l'altitude, de la direction et de la force du vent en altitude. Tout cela contribue à l'accroissement du coefficient de sécurité en vol sur les diverses lignes aériennes.

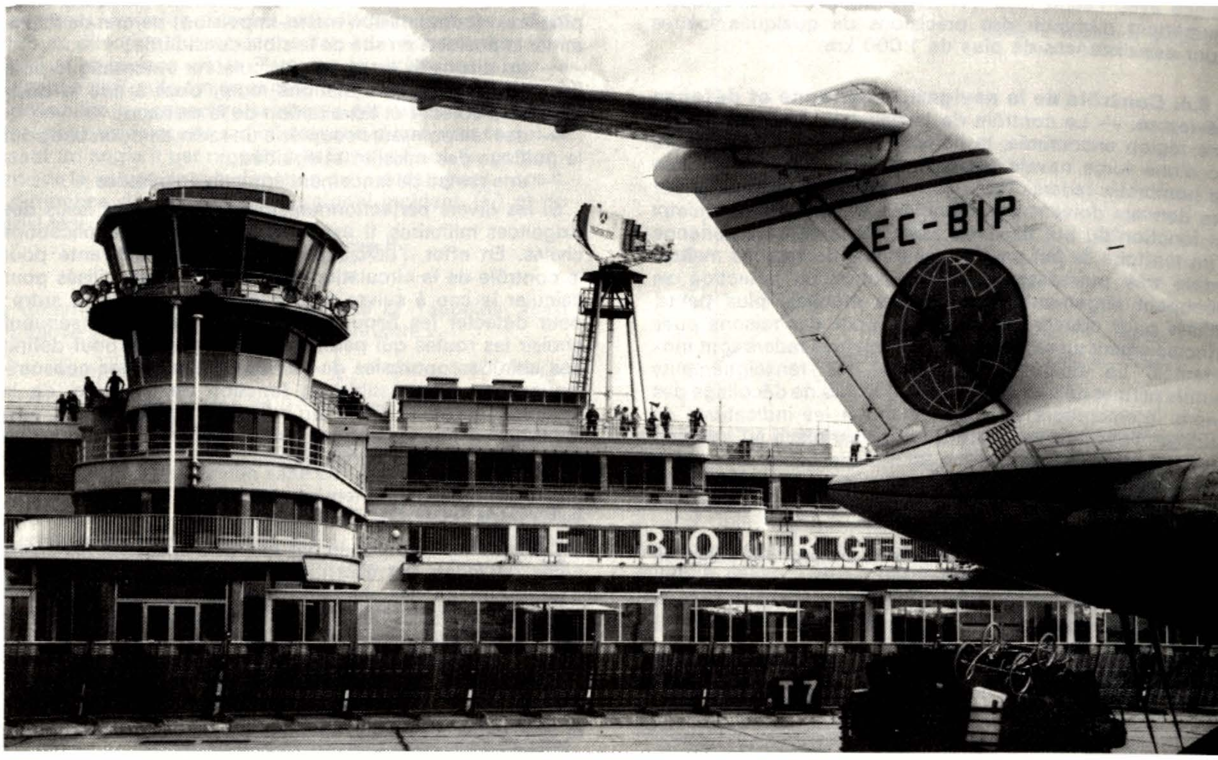
9. ÉVOLUTION DU RADAR

L'orientation des recherches en vue d'améliorer les divers types de radars est essentiellement fonction du domaine d'utilisation de ces derniers. Chaque type de radar doit répondre à des critères bien définis. Ainsi, les radars aéroportés (avions, engins) nécessitent l'étude de composants et sous-ensembles miniaturisés pouvant supporter des conditions climatiques très sévères (— 50 °C à + 100 °C). Les radars de veille militaires exigent une grande précision et une portée maximale, ce qui implique l'élaboration d'une

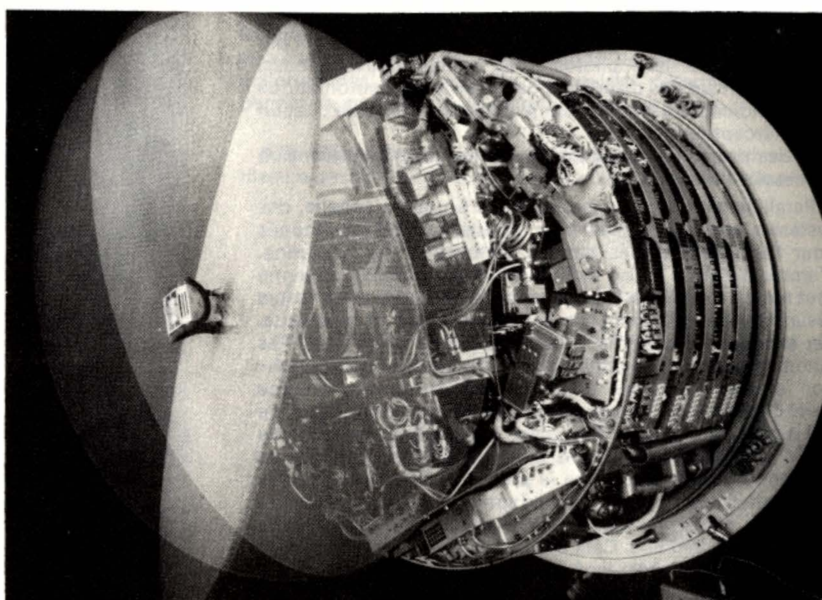


Radar « Palmier » tridimensionnel de veille lointaine à pinceaux étagés (*Thomson-CSF*)

mécanique très fine et la mise en œuvre d'émissions très puissantes ; dans ce cas précis les conditions d'encombrement sont laissées au second plan. Les radars de veille tridimensionnels type Palmier de la Thomson-CSF appartiennent à cette catégorie. L'armée de terre et la marine utilisent le radar dans des systèmes intégrés et outre la précision, l'accent est mis sur deux qualités essentielles : robustesse et résistance mécanique. Les performances des systèmes Masurca, Vega, Crotale, Roland, Domino et Hawk montrent bien dans quelle direction s'orientent les recherches. L'aviation civile et la navigation maritime exigent des radars très élaborés mais ces derniers doivent remplir une fonction bien déterminée afin de résoudre un problème donné. Cela conduit très souvent à prendre d'abord en considération le prix de revient d'un tel équipement. La technique radar est longtemps restée une tech-



Radar de contrôle du Bourget
(*Thomson-CSF*)



Radar Cyrano IV
(*Thomson-CSF*)

nique de détection mais elle s'affirmera de plus en plus comme une technique de reconnaissance des formes. Grâce aux fréquences Doppler et à l'analyse du spectre émis il est possible de distinguer les échos fixes des échos mobiles, mais aussi de distinguer les têtes nucléaires multiples des engins balistiques des leurres qui les accompagnent. L'étude de la réponse spectrale permet de calculer la forme et les dimensions de la cible détectée. Le récepteur devient, à ce titre, un analyseur véritable. L'augmentation de la portée des radars a toujours été une des préoccupations premières des techniciens. Lorsque l'augmentation des puissances de crête pose des problèmes technologiques délicats, l'émission se fait à puissance de crête faible, mais à énergie égale à celle désirée. L'émission doit alors être plus longue, ce qui entraîne des échos reçus plus flous ; c'est là qu'intervient avec des résultats intéressants l'utilisation d'impulsions modulées et codées. Toujours dans le but d'augmenter la portée des ondes radar, il est fait appel à l'émission d'un faisceau plus fin et plus directif. L'augmentation du temps d'exploration qui en résulte ne permet pas de suivre les engins rapides avec beaucoup de précision. Pour remédier à ces inconvénients les techniciens adoptent la solution du balayage électronique. L'antenne ne tourne plus, elle est constituée par plusieurs sources électromagnétiques fixes, orientées dans toutes les directions et elles s'illuminent rapidement les unes après les autres à une cadence de commutation qui est de l'ordre de la microseconde. Ce dispositif permet de revenir sur une cible déjà détectée tout en explorant le reste de l'espace. Les fonctions de veille et de poursuite sont simultanées. Il est probable que l'évolution du radar ira dans le sens d'une miniaturisation toujours plus poussée et parallèlement vers une réduction considérable du nombre des composants, tout en améliorant les performances des dispositifs existants.

CHAPITRE XIV

CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DE L'AVIATION CIVILE

1. LES AÉROPORTS

1.1. Règles administratives et juridiques. — *Les aérodromes* sont des équipements publics ou privés qui permettent d'assurer les décollages, les atterrissages et les manœuvres au sol des aéronefs et leur exploitation technique et commerciale. On réserve l'appellation *aéroports* pour les aérodromes spécialement équipés pour le transport aérien commercial.

Les conditions de création et d'utilisation des aérodromes sont réglementées en France par le Code de l'aviation civile. On distingue les aérodromes « ouverts à la circulation aérienne publique » dont l'utilisation n'est soumise à aucune restriction, les aérodromes à usage restreint, ceux à usage privé et les terrains réservés aux appareils militaires.

Les aéroports français sont exploités soit sous le régime de la concession, soit sous le régime de l'établissement public. Le terme « Aéroport de Paris » désigne un établissement public, à vocation industrielle et commerciale qui assure la gestion des aéroports d'Orly, du Bourget et de Roissy-en-France, ainsi que des aérodromes situés dans un rayon de 50 km autour de Paris. Il est géré par un conseil d'administration de 24 membres et un directeur général, et est placé sous le contrôle de l'État. L'Aéroport de Bâle-Mulhouse est un établissement public à caractère international. Situé sur le territoire français, il est administré par un conseil mixte franco-suisse.

Les autres aéroports français sont concédés, en presque totalité, aux Chambres de commerce et d'industrie locales. Les concessionnaires perçoivent les redevances dues par les utilisateurs (redevances d'atterrissage, de balisage, domaniales, etc.) et apportent des participations souvent importantes au financement des investissements ainsi qu'aux charges d'exploitation.

1.2. Le terrain. — L'établissement d'un aérodrome est lié à de nombreux impératifs auxquels doit satisfaire son site. Il faut d'abord pouvoir disposer d'une surface relativement importante, pour y implanter les équipements et installations nécessaires à son exploitation (Roissy-en-France occupera 3 000 hectares soit le tiers de la surface de la ville de Paris).

L'avion demeure sensible aux conditions météorologiques: régime des vents, conditions de visibilité. Les pistes doivent être orientées dans le sens des vents dominants.

La sécurité de l'évolution des aéronefs, après le décollage ou avant l'atterrissage, impose un espace aérien de grandes dimensions associé à l'aérodrome, protégé de tous obstacles artificiels ou naturels dont la hauteur serait un danger pour les avions, surtout dans le prolongement des pistes. Cet

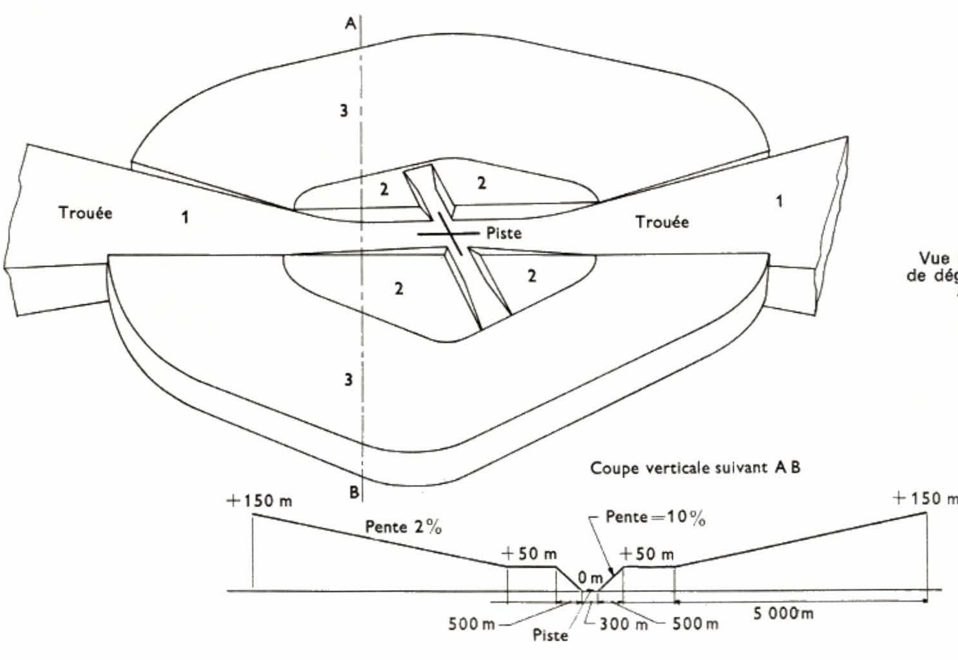


Fig. XIV-1

Vue perspective des surfaces de dégagement d'un aérodrome autre qu'un héliport

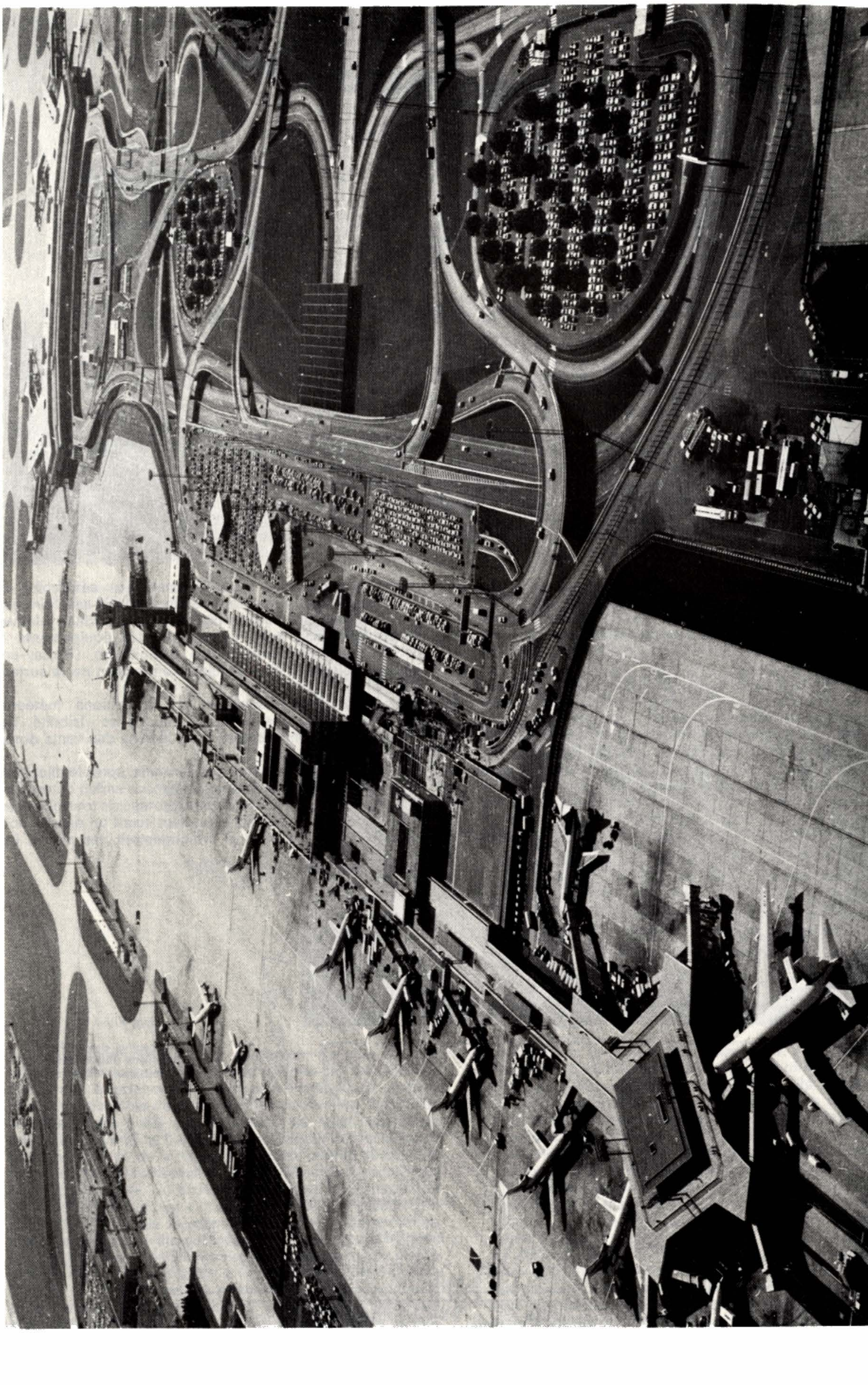


Fig. XIV-2 — Aéroport d'Orly : aérogare sud au centre, aires de trafic tout autour, piste en haut à gauche, tour de contrôle en haut au centre et en haut à droite, nouvelle aérogare d'Orly-Ouest (*Jean-J. Moreau - Aéroport de Paris*)

espace constitue les surfaces de dégagement fictivement représentées par :

— un couloir rectiligne d'accès et de sortie de l'aérodrome en prolongement de la bande d'envol, la *trouée d'envol* (V. fig. XIV-1, 1) ;

— un *plan horizontal intermédiaire* situé entre les trouées d'envol (V. fig. XIV-1, 2) ;

— une *surface conique de dégagement* située au-delà du plan horizontal intermédiaire (fig. XIV-1, 3).

De même les installations radioélectriques d'aide à la navigation doivent être protégées des effets parasites environnants qui entraveraient leur fonctionnement.

Cela entraîne des servitudes pour les propriétaires des fonds voisins des aérodromes : nature et hauteur des constructions, et balisage de jour comme de nuit des obstacles dangereux pour les navigateurs.

Ainsi un aérodrome est essentiellement constitué :

— d'une *plate-forme* sur laquelle sont construites les *pistes* et les *aires de manœuvre ;*

— d'*installations terminales* destinées au service des avions et de leurs cargaisons ;

— d'un *espace aérien* constituant les dégagements.

L'ensemble de ces trois éléments est matérialisé par un plan de masse, véritable schéma directeur d'aménagement de l'aérodrome.

1.3. La plate-forme ou aire de manœuvre. — L'installation essentielle d'un aérodrome est la piste sur laquelle peuvent atterrir et décoller les aéronefs. Certains aérodromes ont plusieurs pistes : en général une principale et des pistes secondaires.

Les dimensions des pistes sont fonction de la nature des liaisons que doivent assurer les aéronefs civils qui fréquentent l'aérodrome et du type de ceux-ci.

On est ainsi conduit à distinguer :

— *Les aérodromes de catégorie A*, destinés aux services intercontinentaux à grande distance, disposant au moins d'une piste de 3 000 mètres de long (fig. XIV-2).

— *Les aérodromes de catégorie B*, destinés aux services à moyenne distance, disposant d'une piste d'une longueur de 2 000 mètres.

— *Les aérodromes de catégorie C*, destinés aux services à courte distance et à l'aviation générale (piste de 1 000 à 1 500 mètres).

— *Les aérodromes de catégorie D*, destinés à la formation aéronautique de base, aux sports aériens et au tourisme. Ils peuvent n'être équipés que d'une simple bande gazonnée de moins de 1 000 mètres de longueur.

Les pistes sont construites de manière à pouvoir résister aux charges dues au décollage et à l'atterrissage des aéronefs. En principe on prend dans les calculs la charge maximale d'une roue de l'avion équivalent à la catégorie à laquelle répond l'aérodrome :

— 45 t pour la catégorie A (avec pression de 10 bars) ;
— 20 t pour la catégorie B (avec pression de 7 bars) ;
— 9 t pour la catégorie C (avec pression de 5 bars) ;
— 2,25 t pour la catégorie D (avec pression de 3 bars).

La largeur des pistes est fonction de la largeur de la voie du train d'atterrissage des divers types d'appareils. Cette largeur est de 45 mètres pour les pistes des catégories A et B, de 25 à 30 mètres pour les autres catégories.

1.3.1. Voies de circulation ou taxiways. — Pour permettre aux aéronefs d'évoluer au sol, les pistes sont reliées aux aires de stationnement par des voies de circulation, dont le tracé est étudié de façon à faciliter la circulation des avions ; il doit être court et présenter aussi peu de virages que possible.

L'utilisation des avions à réaction qui se déplacent assez rapidement au sol a imposé d'équiper les pistes de *sorties à grande vitesse* vers les voies de circulation, qui au lieu d'être perpendiculaires à la piste forment un angle ouvert avec celle-ci.

Pour permettre à plusieurs avions de stationner juste avant leur décollage, on aménage la voie de circulation aboutissant à l'extrémité de la piste, en *aire d'attente*. Cette aire d'attente peut être :

— soit une bretelle parallèle à la voie ;

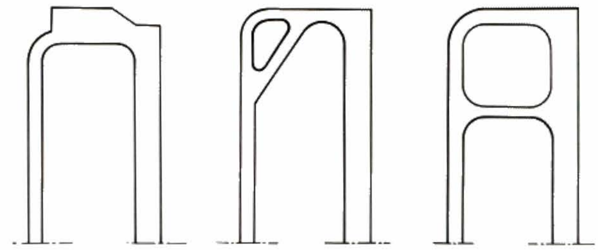


Fig. XIV-3 — Disposition des aires d'attente

— soit une voie sécante à 45° aboutissant à l'extrémité de la piste ;

— soit un élargissement de la voie de circulation (fig. XIV-3).

1.3.2. Les aires de stationnement. — Sur les aérodromes importants on distingue :

1° *Les aires de trafic.* — Elles sont utilisées par les aéronefs pour effectuer les opérations commerciales (embarquement des passagers et du fret), d'avitaillement (ravitaillement en carburant) et de petit entretien. Elles sont placées devant ou autour de l'aérogare et subdivisées en postes de trafic, c'est-à-dire en emplacements assignés à chaque appareil. La disposition de ces postes est variable, car on essaye d'en loger le maximum à proximité immédiate de l'aérogare :

— postes de trafic alignés le long de l'aérogare ;

— postes de trafic répartis sur plusieurs files parallèles ou perpendiculaires à l'aérogare ;

— postes de trafic disposés de part et d'autre de couloirs d'accès ou « jetées » (*fingers*) qui avancent de l'aérogare sur l'aire de trafic (V. fig. XIV-4) ;

— postes de trafic distribués autour des aérogares satellites (V. fig. XIV-8).

2° *Les aires de garage.* — Elles sont utilisées soit pour l'entretien en escale, soit pour un stationnement prolongé de l'appareil entre deux vols,

3° *Les aires d'entretien.* — Elles sont utilisées pour le grand entretien des avions ; elles sont attenantes aux hangars d'entretien, et sont parfois pourvues d'abris partiels (abri de nez) pour les appareils en réparation.

1.3.3. Construction des chaussées (pistes et aires). — Pour une large part cette construction fait appel à la technique routière et autoroutière, mais avec des contraintes plus importantes. Si le trafic d'une piste d'aérodrome est inférieur à celui d'un grand axe routier, celle-ci supporte des charges plus importantes : 45 tonnes par roue au lieu de 6,5 tonnes pour les véhicules routiers en France ; 15 et même 27 bars en pression de gonflage des pneumatiques, au lieu de 2 bars pour les véhicules automobiles. Aussi la structure des chaussées des pistes est-elle beaucoup plus importante que celle des routes et l'épaisseur de la fondation est calculée en conséquence.

Elles comprennent différentes couches de matériaux : couche de forme, sous-couche anticapillaire ou anticontaminante, couche de fondation, couche de base, couche de surface.

La chaussée est dite « souple » si le revêtement est à base de liants hydrocarbonés (bitume) ou « rigide » s'il est réalisé en béton de ciment.

La réalisation des travaux s'effectue à l'aide des moyens mécaniques puissants et à haut rendement dont disposent les entreprises de travaux publics modernes : fabrication des bétons bitumineux ou de ciment en unité centrale, et mise en œuvre sur place au moyen de répandeuses-finisseuses guidées électroniquement qui laissent sur leur passage une chaussée terminée (V. fig. XIV-5).

La construction de la chaussée rigide fait, en particulier, appel aux techniques les plus modernes qui permettent de s'affranchir de la sujétion des coffrages en utilisant le système du coffrage glissant sans joints, ces derniers étant exécutés après coup à l'aide d'une scie à béton spéciale.

Grâce à ces techniques on obtient des surfaces dont la planéité et l'uni correspondent aux exigences des avions modernes. Les imperfections de la surface restent inférieures



Fig. XIV-4 — Aire de trafic de l'aérogare d'Orly-Ouest (*Jean-J. Moreau — Aéroport de Paris*)

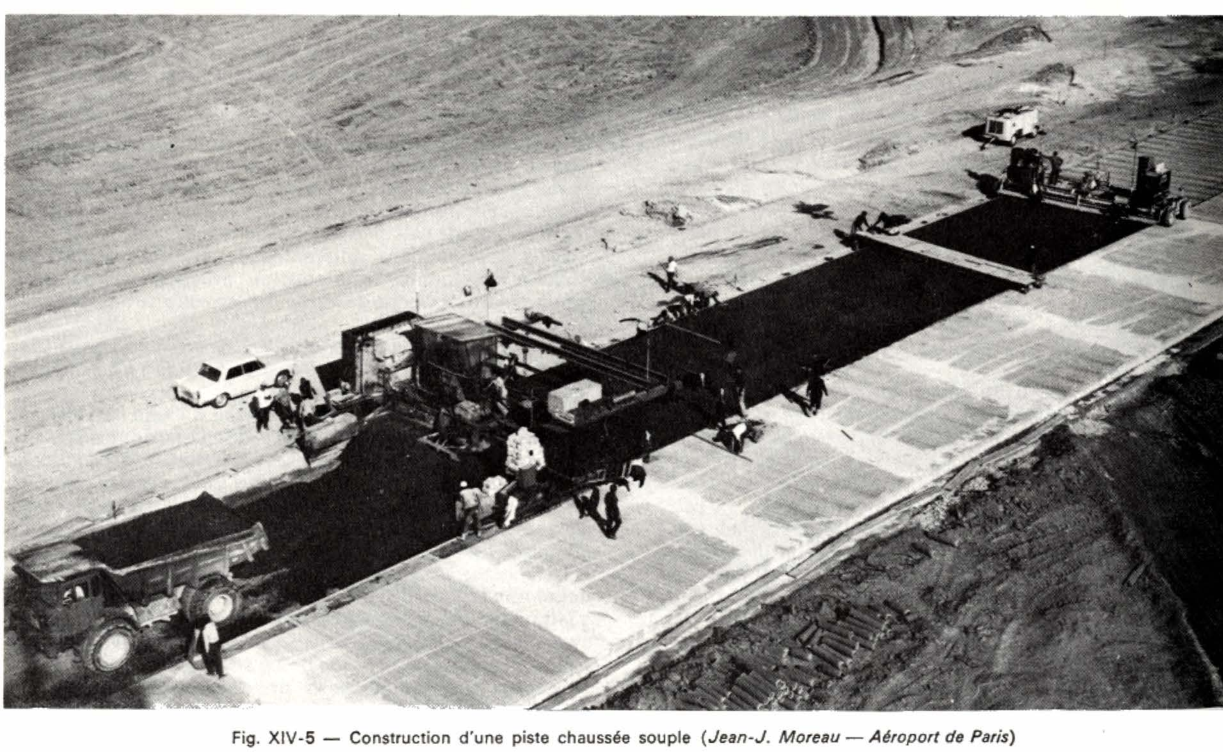


Fig. XIV-5 — Construction d'une piste chaussée souple (*Jean-J. Moreau — Aéroport de Paris*)

à des différences en plus ou en moins de 3 mm de dénivellation sur une distance de 3 m.

Un soin tout particulier doit être apporté, au moment de la construction des aires, à l'assainissement de la plateforme qui conditionne la tenue des ouvrages, en raison des grandes dimensions des bassins versants et des faibles pentes qu'autorise en général la topographie des lieux. Le recueil des eaux de ruissellement de la piste s'effectue généralement à l'aide de caniveaux latéraux fendus suivant la génératrice supérieure, type Satujo, dont la confection est facilitée par l'utilisation d'un coffrage en plastique gonflé.

1.3.4. Balisage. — Les aides visuelles ou balisage sont destinées à faciliter l'utilisation des pistes et aires de manœuvre en fournissant au pilote des repères visuels standardisés qui complètent les repères radioélectriques utilisés pour l'approche. On distingue le *balisage de jour* et le *balisage lumineux* utilisable la nuit et par mauvaise visibilité.

Le balisage de jour matérialise au sol l'axe des chaussées, quelquefois la limite latérale de la piste ainsi que les seuils d'entrée de piste. Certaines indications précisent au pilote la piste sur laquelle il se trouve et le cheminement à emprunter pour se rendre à l'aire de stationnement.

Une aire à signaux, contenant un indicateur de direction d'atterrissage sous la forme d'un *té* mobile, donne les indications indispensables aux avions démunis de liaisons radio air-sol ; ces indications sont complétées par la manche à vent.

Le balisage et la signalisation lumineuse matérialisent, à l'aide de feux de couleur appropriée, la délimitation des aires d'évolution et quelquefois l'axe de la piste. Ces balises électriques peuvent être encastrées dans la chaussée suivant l'axe de la piste, ou hors sol. Les obstacles sont également balisés à l'aide de feux rouges de danger.

En outre, sur les aéroports fréquentés par les aéronefs à approche rapide, on installe parfois un système de projecteurs dénommé *Vasis* qui matérialise par des couleurs différentes, la pente que les aéronefs doivent respecter dans leur approche.

1.3.5. Aides radioélectriques. — Destinées à faciliter l'approche et l'atterrissage des aéronefs par mauvaise visibilité, elles sont installées aux abords de l'aérodrome.

Pour l'approche sont utilisés des radiobalises ou radiophares (ex V.O.R.) du même type que ceux employés pour le contrôle en route. En outre, l'évolution des aéronefs est aidée et suivie par les services de contrôle de la circulation aérienne utilisant des radiogoniomètres ou des radars.

Pour les atterrissages de précision deux systèmes peuvent être utilisés, l'ILS (*Instrument Landing System*) et le radar d'approche de précision (V. § 2.3 et chap. 13 § 7.3).

1.3.6. Barrières d'arrêt. — Ces installations, capables de capter sans danger les avions qui dépassent accidentellement l'extrémité de piste, sont déjà implantées sur les aérodromes militaires d'un grand nombre de pays. On poursuit actuellement leur adaptation à l'aviation civile où le poids des appareils en jeu est considérable et pose de nouveaux problèmes.

Les dispositifs utilisés à ce jour comprennent :

— un organe de capture, filet ou câble ;

— un câble, ou une sangle, traîné par l'organe de capture, après que celui-ci se soit lié à l'avion ;

— un frein limitant le mouvement du câble ou de la sangle.

Cet ensemble est implanté, en position abaissée, à l'extrémité de la piste. Son relèvement est commandé soit par la tour de contrôle, soit par le pilote, soit par un système automatique.

1.4. Les installations aéroportuaires

1.4.1. Les aérogares. — Elles sont les installations terminales qui permettent d'assurer les fonctions commerciales de l'aéroport. La conception de ces bâtiments dépend du trafic aérien et de l'évolution de ses caractéristiques, de considérations économiques et de facteurs humains ; elle a considérablement évolué dans le temps, au fur et à mesure du développement de l'aviation commerciale. On cherche encore aujourd'hui la formule idéale d'aérogare.

De la petite aérogare à faible trafic dans laquelle le passager se rend directement de la voiture à son avion par un parcours de quelques dizaines de mètres, sans installation mécanique ni parcours compliqué, on est passé aux aérogares de type linéaire à un ou deux niveaux dans lesquels le passager a de grandes distances à parcourir et des circuits compliqués à suivre, puis aux aérogares à jetées couvertes permettant aux passagers de se rendre à pied, à l'abri des intempéries, jusqu'aux avions stationnés de part et d'autre de la jetée.

Aujourd'hui, on conçoit des aérogares à satellites autour desquels sont groupés les avions. Ces satellites sont réunis à l'aérogare principale par des galeries ou des jetées couvertes. Le parcours des passagers peut être facilité par des tapis mécaniques allant de l'aérogare aux satellites (fig. XIV-6).



Fig. XIV-6 — Détail d'une passerelle télescopique : le sas d'entrée vers l'appareil. (*Michel Isaac-Air et Cosmos*)

On peut même faire l'économie des jetées ou satellites en effectuant, comme à Washington, le transport des passagers dans des salles d'attente sur roues (*mobile-lounge*).

Pour le futur, on s'oriente vers l'aérogare développée (ou décentralisée) constituée par une série de petites aérogares unitaires placées les unes à la suite des autres, en particulier vers le système baptisé « colliers de perles », ces colliers pouvant être rectilignes ou en formes de cercle.

Quelle que soit sa forme, l'aérogare doit permettre le transfert des passagers et de leurs bagages entre les avions et les transports de surface ou entre avions, dans des conditions d'économie et d'efficacité, et doit comporter :

— des circulations et des espaces de stationnement pour les passagers ;

— des moyens de convoyer les bagages et de les délivrer aux voyageurs ;

— des surfaces : bureaux et banques d'enregistrement pour les compagnies, — bureaux pour les services de contrôle (douane, police, services de santé) ;

— des installations pour les commerces et les prestataires de service.

L'aérogare internationale faisant office de frontière, des procédures particulières sont imposées au parcours des passagers et de leurs bagages. La procédure inaugurée à Orly, et généralisée dans le monde sous le nom d'*Orly system*, consiste à permettre au voyageur à l'arrivée d'accéder dans le hall public aussitôt effectuées ses formalités personnelles et de ne récupérer ses bagages enregistrés que par la suite. C'est une simplification pour le passager, mais cela implique une double intervention de la

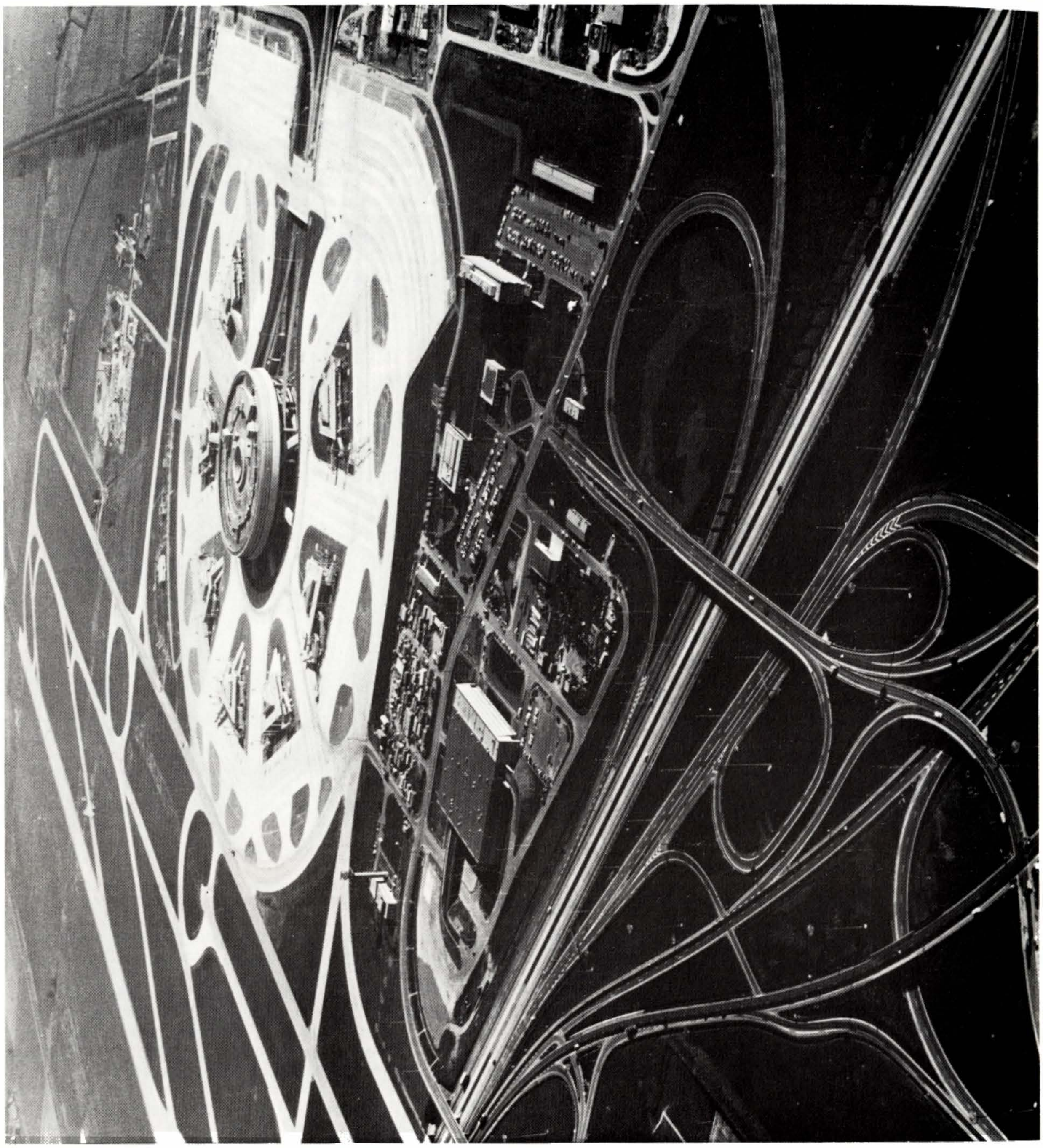


Fig. XIV-7

Aéroport de Roissy-Charles de Gaulle : en haut à gauche, la piste n° 1, les voies de circulation et de sorties de piste ; au centre, l'aérogare n° 1 au premier plan, l'autoroute A1 et l'échangeur desservant l'aéroport

(Jean-J. Moreau, Aéroport de Paris)

douane. On s'oriente actuellement vers l'établissement de deux circuits: l'un, direct (le « vert »), pour les passagers n'ayant rien à déclarer, l'autre, (le « rouge ») pour les autres cas. Le contrôle dans le circuit vert est fait par sondage.

1.4.2. L'aérogare de fret. — Jusqu'à ces dernières années, l'aérogare de fret, servant au transfert et à l'entrepôt des marchandises transportées par avion, était essentiellement un hangar, divisé en partie réservée aux importations et en partie réservée aux exportations, chacune d'elles étant subdivisée en zone sous douane et zone hors douane.

Sur les aéroports où l'on manipule plusieurs centaines de milliers de tonnes de fret, on arrive à la conception de l'aérogare automatisée, banalisée, où les marchandises suivent un trajet autonome, séparé du trajet des documents, les uns et les autres étant positionnés à chaque instant par des ordinateurs qui effectuent également les opérations en douane.

1.4.3. Le bloc technique. — C'est l'installation destinée à abriter le commandement, le contrôle et l'exploitation technique de l'aérodrome. On y trouve notamment les bureaux d'information aéronautique et d'assistance météorologique du personnel navigant, les salles de contrôle de la circulation aérienne et les installations de télécommunications. Généralement, on y adjoint le bâtiment des moyens généraux: centrale électrique de secours, moyens de lutte contre l'incendie, garage des véhicules de service.

Le bloc technique est généralement surmonté d'une tour de contrôle coiffée de la vigie: cabine vitrée dans laquelle se trouvent les contrôleurs d'aérodrome qui règlent le mouvement des avions.

1.4.4. Les installations industrielles. — Elles sont destinées à permettre l'entretien et la révision des aéronefs.

Les hangars d'entretien sont généralement à auvents (ou à double auvents), sans appui de façade, ce qui permet d'y faire pénétrer de gros appareils dont le nez s'encastre dans les poteaux d'appui relégués au fond des hangars. En dehors des périodes d'entretien les appareils stationnent en plein air.

1.5. Un aérodrome moderne: Roissy-en-France. — Le trafic des passagers aériens à Paris double tous les cinq ou six ans. Bien que la capacité d'Orly ait été portée de 6 millions de passagers en 1960 à près de 15 millions actuellement, il était devenu nécessaire de prévoir la construction d'un troisième aérodrome dans la région parisienne, puisque l'aéroport du Bourget, étroitement imbriqué dans des zones urbanisées, ne pouvait être développé.

C'est à Roissy-en-France, à 27 km de Paris, qu'a été tracé, dans une région peu accidentée et très peu bâtie, le site du nouvel aéroport, qui est entré en service en 1974 (fig. XIV-7).

Ses aménagements ont été conçus pour une activité annuelle, en phase finale, de 50 millions de passagers et de 2 millions de tonnes de fret, sur la base d'un trafic horaire d'environ 160 mouvements.

Le plan de masse prévoit quatre pistes parallèles groupées deux à deux, permettant atterrissages et décollages simultanés.

La zone des passagers comprend plusieurs aérogares. La première aérogare, d'une capacité de 6 à 10 millions de passagers par an, est de forme circulaire et est entourée de sept bâtiments satellites reliés par souterrain au corps central (fig. XIV-8). Celui-ci, d'un diamètre de 190 mètres, comporte dix niveaux ayant les affectations suivantes:

— Le deuxième sous-sol: tri des bagages;

— Le premier sous-sol: les équipements commerciaux et les restaurants;

— Le rez-de-chaussée: les banques d'enregistrement de bagages;

— Le premier étage: les services de douane et de police;

— Le deuxième étage: la livraison des bagages;

— Le troisième étage: les locaux techniques;

— Les étages supérieurs: ils sont utilisés comme parc de stationnement automobile à raison de 900 véhicules par niveau;

— Le stationnement des avions se fait autour des satellites auxquels ils sont reliés par des passerelles télescopiques;

— La zone de fret comprend 10 ha de magasins couverts, 30 000 m² de bureaux, 250 postes à quai pour les camions et 30 postes pour les avions cargos;

— Le bâtiment du centre aéroportuaire de la navigation aérienne comprend une tour de contrôle de 80 m de



Fig. XIV-8 — Maquette de la première aérogare de Roissy-en-France (*Jean-J. Moreau — Aéroport de Paris*)



Fig. XIV-9 — Roissy-en-France : le centre aéroportuaire de la navigation aérienne (*Jean-J. Moreau — Aéroport de Paris*)

hauteur et un bloc technique construit en forme d'arc (fig. XIV-9).

Une particularité de l'aéroport de Roissy-en-France est la présence de ponts pour avions, franchissant l'autoroute Nord de Paris, capables de supporter des avions d'une masse totale de 700 tonnes.

L'accès de l'aéroport de Roissy-en-France est assuré par une autoroute à six voies (trafic de pointe de 10 000 véhicules par heure), et à terme par des liaisons de transports en commun par voie ferrée ou aérotrain.

1.6. Les plates-formes spécialisées. — En dehors des aérodromes classiques, les aéronefs peuvent disposer des plates-formes suivantes :

— *Les hélistations.* — Aérodromes équipés pour recevoir les hélicoptères et disposant d'une aire d'atterrissage réduite (120 m de longueur et 60 m de largeur).

— *Les héliports.* — Hélistations utilisées pour le trafic commercial, parfois dotées d'une aérogare.

— *Les hélisurfaces.* — Simples surfaces de dimensions très réduites (15 m × 15 m) utilisées occasionnellement pour des travaux aériens ou l'évacuation de blessés.

— *Les altistations, appelées aussi « altiports ».* — Ce sont des aérodromes établis dans les régions montagneuses pour desservir des stations de sports d'hiver. Ils sont utilisés par des avions à décollage et atterrissage courts (A.D.A.C.) dont les pilotes sont spécialement qualifiés.

Les pistes, revêtues pour s'opposer à l'érosion due aux intempéries, présentent des pentes importantes ; leur longueur ne dépasse pas 300 mètres. L'atterrissage se fait face au relief, le décollage en sens inverse, vers la vallée. Généralement la configuration de la vallée sur laquelle débouche l'aérodrome conduit à avoir une trouée d'envol courbe, en plongée.

— *Les avisurfaces.* — Ce sont de simples bandes d'envol employées occasionnellement qui peuvent être établies sur des glaciers, sans équipement spécial.

— *Les adacports ou stolports* (aéroports pour appareil à décollage et atterrissage courts, en anglais *short take-off and landing*). — Ce sont des terrains, dont les caractéristiques sont à l'étude, qui permettront une desserte directe des zones urbaines, aussitôt que des appareils A.D.A.C. à bas niveau de bruit auront pu être mis au point.

1.7. Insertion de l'aéroport dans l'urbanisme. — Les problèmes les moins faciles à résoudre, en matière d'aéroport, sont actuellement ceux qui sont extérieurs à l'emprise, à savoir les accès, d'une part, l'environnement, de l'autre.

Les difficultés d'accès aux aéroports, ou plutôt de l'organisation des transports de surface qui sont le prolongement du transport aérien, sont susceptibles de constituer, pour ce dernier, un très gros handicap, dans toutes les grandes agglomérations. Des études variées ont montré l'absolue nécessité de relier Orly et Roissy-en-France à Paris et entre eux, par des moyens de transport en commun rapides destinés à compléter les voies routières et autoroutières. De même, dans les autres grandes villes ou grandes régions urbaines, il est indispensable que les projets routiers et autoroutiers assignent un rôle spécial à la desserte de l'aéroport et que la possibilité de transports en commun destinés à le desservir soit réservée (chemin de fer, aérotrain).

L'un des aspects des problèmes d'environnement posés par les aéroports est celui des nuisances de toute nature qu'ils occasionnent à leur voisinage parmi lesquelles le bruit semble être la plus importante. Bien que des efforts constants soient faits — et des résultats notables obtenus — pour améliorer le matériel volant et réduire ainsi le bruit « à la source », il est de plus en plus urgent de coordonner

étroitement le développement ou la création des aéroports avec l'urbanisation et l'occupation du sol dans leurs alentours.

Il faut bien noter que ce serait une conception erronée et anti-économique que de vouloir résoudre le problème de l'environnement des aéroports en entourant en quelque sorte ceux-ci de déserts : la clientèle des aéroports ainsi que leur personnel ne sauraient s'accommoder de transports terminaux trop longs et trop onéreux.

L'aéroport est, en fait, un pôle d'emploi et d'activité très important dont les effets incitateurs sur l'économie sont de plus en plus sensibles. Nombre d'activités économiques peuvent être attirées par lui : industries de transformation, entrepôts, bureaux et services. Il faut donc chercher à favoriser ces implantations qui doivent, bien entendu, respecter les servitudes de l'aéroport et les contraintes nécessaires à son propre développement.

A - MOUVEMENTS D'AVIONS

Aéroports	1961	1970	1975
New York-Kennedy	265 300	410 000	446 000
Los Angeles	235 000	420 000	850 000
San Francisco	130 000	310 000	430 000
Montréal	61 000	110 000	
Buenos Aires	27 000	60 000	67 500
Londres	147 000	240 000	363 000
Paris	101 000	210 000	361 000
Francfort	97 000	160 000	
Rome	95 000	65 000	175 000
Amsterdam	53 000	95 000	186 000
Berlin	40 000	75 000	
Zurich	49 000	92 000	127 200

B - TRAFIC PASSAGERS

Aéroports	1961	1970	1975
New York-Kennedy	10 145 000	19 508 000	30 800 000
Los Angeles	6 862 000	21 310 000	18 600 000
San Francisco	4 760 000	14 000 000	13 500 000
Montréal	1 950 000	4 100 000	4 600 000
Buenos Aires	680 000	2 180 000	4 000 000
Londres	6 000 000	18 000 000	28 000 000
Paris	3 800 000	11 000 000	24 500 000
Francfort	2 300 000	9 400 000	
Rome	1 900 000	3 000 000	11 000 000
Amsterdam	1 400 000	5 000 000	
Berlin	1 600 000	5 000 000	
Zurich	1 400 000	4 000 000	7 500 000

En définitive, équiper l'infrastructure du transport aérien, c'est non seulement mettre à sa disposition les installations techniques, et commerciales nécessaires à son exercice, mais c'est aussi, de plus en plus, promouvoir des zones d'activité qui doivent s'insérer dans un aménagement du territoire soucieux du développement économique et d'un environnement de qualité.

C - FRET (tonnes)

Aéroports	1961	1970	1975
New York-Kennedy	260 000	800 000	1 725 000
Los Angeles	120 000	400 000	581 000
San Francisco	98 000	300 000	
Montréal	20 000	90 000	150 000
Buenos Aires	3 100	38 000	76 000
Londres	107 000	400 000	1 100 000
Paris	96 000	250 000	620 000
Francfort	68 000	270 000	
Rome	26 500	50 000	180 000
Amsterdam	52 000	160 000	400 000
Berlin	18 000	25 000	
Zurich	22 000	90 000	206 500

2. LA NAVIGATION AÉRIENNE

2.1. Généralités. — La navigation aérienne peut être définie comme l'ensemble de l'appareil administratif et des moyens techniques qui permettent à l'aéronef de suivre une trajectoire dans des conditions de sécurité suffisantes, au sol et dans l'espace.

Cela implique qu'il existe :

— des aides à la navigation aérienne : moyens de guidage installés au sol ou à bord, système donnant la position ;

— une information du pilote dans des domaines variés : réglementation, état de fonctionnement des aides et de l'infrastructure, situation météorologique, etc. ;

— des services de la circulation aérienne, tels que le « contrôle » par lequel les abordages d'aéronefs sont évités grâce à l'application de normes (ou minimums) de séparation.

Aux missions principales découlant de ces exigences, s'ajoute le service de « recherche et sauvetage » (désigné internationalement par le sigle SAR) qui a pour but de porter secours aux aéronefs en péril : il met en œuvre des avions patrouilleurs spécialement équipés pour la recherche, des équipements de secours largables, etc.

La mise en œuvre des infrastructures et la fourniture des prestations de navigation aérienne sont considérées comme un service public dont la responsabilité incombe aux États. Mais, parce que l'aviation civile présente un caractère international très marqué, une normalisation des procédures d'exploitation et des matériels techniques tant au sol qu'à bord et une planification coordonnée du déploiement des infrastructures sont indispensables : celles-ci sont assurées essentiellement dans le cadre de l'Organisation de l'aviation civile internationale (O.A.C.I.).

La réglementation française considère trois catégories de circulation aérienne :

— la Circulation aérienne générale (C.A.G.),

— la Circulation opérationnelle militaire (C.O.M.),

— la Circulation d'essais et de réception (C.E.R.).

Tout ce qui se rattache aux deux dernières est mis en œuvre dans le cadre de l'organisation propre au ministère

chargé de la Défense nationale. Dans ce paragraphe, il ne sera question que de la circulation aérienne générale, qui comporte les vols civils et quelques vols militaires (de transport, par exemple) et qui obéit aux règles issues de l'O.A.C.I.

En France, l'administration civile responsable de la navigation aérienne est, au ministère des Transports, le Secrétariat général à l'Aviation civile qui comporte notamment, à l'échelon central, une direction de la Navigation aérienne et des services techniques. En outre, trois directions régionales de l'Aviation civile ont sous leur autorité, en métropole, les organismes d'exploitation : centres de contrôle régional, services de la navigation aérienne sur chaque aérodrome, centre de télécommunications, organismes de maintenance des installations techniques.

2.2. Principes et organisation

2.2.1. La navigation. — L'activité de navigation aérienne suppose tout d'abord que l'aéronef puisse suivre avec une certaine précision la route désirée : c'est la fonction de navigation proprement dite qui, dans la réglementation civile, est, sauf dans des circonstances exceptionnelles, de la compétence et sous la responsabilité du pilote commandant de bord.

À l'origine de l'aviation, les méthodes de navigation ont été inspirées par l'expérience ancienne de la navigation maritime ; mais les nécessités du vol dans les nuages, l'absence de repères visuels précis, la vitesse des avions, ont vite conduit à recourir à des moyens spécifiques. Les méthodes de navigation peuvent se classer en :

— navigation à vue, basée sur les repères au sol ;

— navigation à l'estime, fondée sur la tenue d'un cap et l'appréciation de la distance parcourue, en fonction du temps, de la vitesse propre de l'aéronef et du vent estimé (fig. XIV-10) ;

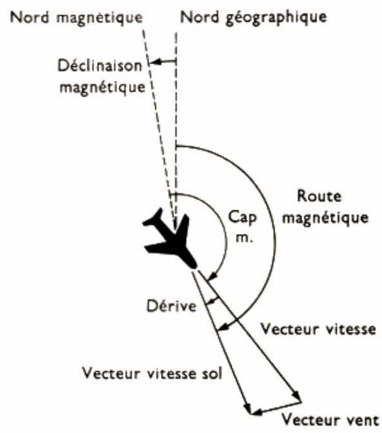


Fig. XIV-10 — Principales composantes de la navigation à l'estime et triangle des vitesses

— navigation astronomique, qui consiste à faire le point par des relèvements angulaires d'astres (peu utilisée, sauf dans les vols polaires) ;

— radionavigation, de loin la catégorie de procédés la plus utilisée, qui met à profit diverses propriétés des ondes radioélectriques émises par des radiophares au sol ;

— navigation aux aides autonomes de bord sans recours à aucune infrastructure au sol : c'est principalement l'utilisation des plates-formes à inertie (ensemble d'instruments référés à des gyroscopes ; V. chap. 9).

2.2.2. Conditions et règles de vol. — La réglementation internationale codifie ces deux notions.

1° *Conditions.* — Les conditions de vol caractérisent la possibilité reconnue ou non d'assurer la sécurité du vol, notamment la prévention des abordages, par la vision extérieure. On distingue donc les conditions VMC (*visual meteorological conditions*, conditions météorologiques de vol à vue) et les conditions IMC (*instruments meteorological conditions*, conditions météorologiques de vol aux instruments).

Les conditions VMC correspondent, si l'aéronef est dans un espace contrôlé ou de toute façon au-dessus de 900 mètres d'altitude par rapport au niveau de la mer ou de 300 mètres au-dessus du sol, à une visibilité horizontale supérieure à 8 000 mètres, les distances horizontale et verticale aux nuages étant respectivement supérieures à 1 500 et 300 mètres. Hors espace contrôlé et au-dessous des altitudes sus-indiquées, il suffit d'avoir une visibilité horizontale de 1 500 mètres et d'être hors des nuages. Hors de ces cas, et de façon générale la nuit, on se trouve en conditions IMC.

2° *Règles de vol.* — Les règles de vol sont au nombre de deux : VFR (*visual flying rules*, règles de vol à vue) et IFR (*instrument flying rules*, règles de vol aux instruments). Chacune correspond à des consignes et procédures particulières. En conditions IMC les règles IFR sont obligatoires, en conditions VMC le pilote peut choisir l'un ou l'autre régime.

2.2.3. Organisation de l'espace — Altimétrie. — Pour satisfaire les exigences souvent contradictoires de tous les usagers de l'espace, (aviation légère, transport aérien, aviation militaire), tout en assurant la sécurité et la régularité du trafic, il a été nécessaire de donner des statuts aux différentes parties de l'espace. Si la délimitation en plan de ces espaces se conçoit facilement, en revanche, il est indispensable de faire appel à des notions d'altimétrie pour les définir en volume.

L'altimètre indique au pilote, en mètres ou en pieds, une altitude conventionnelle et non réelle. C'est, en effet, un baromètre qui mesure la pression atmosphérique et lui fait correspondre par calage de la graduation tournante de l'instrument une distance verticale. Il existe trois calages altimétriques usuels :

— le *Q.F.E.*, dans lequel l'altimètre indique zéro au sol et donne ainsi la hauteur au-dessus du sol : il est employé dans les phases de décollage et d'atterrissage ;

— le *Q.N.H.*, dans lequel l'altimètre indiquerait zéro au niveau de la mer et qui donne ainsi l'altitude à condition que l'atmosphère soit dans des conditions de pression et de densité dites normales, ce qui n'est généralement pas le cas, mais ne comporte pas d'inconvénient parce que les autres avions adhèrent à la même convention ; ce calage est utilisé dans les basses couches par l'aviation légère ;

— le *calage 1013.* Pour pouvoir étager les aéronefs en vol horizontal en tous lieux, indépendamment de la pression atmosphérique de la région, il faut recourir à un calage normalisé universel : on prend celui pour lequel l'altimètre indique 0 lorsque la pression ambiante est de 1 013 millibars, valeur qui est celle de la pression au niveau de la mer dans les conditions de l'atmosphère normale. Avec ce calage, l'instrument indique la distance verticale au-dessus de l'isobare 1 013 mbar : c'est ce que l'on appelle une altitude-pression. On utilise ce calage au-dessus de 900 m d'altitude avec la convention suivante : on parle uniquement en *niveau de vol* mesuré par le nombre des centaines de pieds : par exemple, le niveau 90 signifie l'altitude-pression de 9 000 pieds (ou 2 700 mètres).

Ces notions sont utilisées notamment pour définir l'étendue verticale des espaces aériens.

En France on distingue principalement (fig. XIV-11) :

— *Les espaces contrôlés.* — Ce sont, d'une part les zones d'aérodrome, volumes cylindriques descendant jusqu'au sol, d'autre part les régions contrôlées, dont le plancher est au moins au niveau 30, qui se subdivisent elles-mêmes en :

- routes aériennes (AWY), sortes de couloirs de largeur définie (généralement 5 miles nautiques de part et d'autre de l'axe) ;
- régions terminales (TMA), vastes carrefours de routes au voisinage des grands aéroports (la TMA de Paris s'étend approximativement entre Troyes, Chartres et Saint-Quentin) ;
- région supérieure de contrôle (UTA), qui couvre toute la France entre les niveaux 195 et 460.

— *Les espaces non contrôlés.* — Ils sont situés en dehors des précédents, notamment dans les basses couches au voisinage du sol.

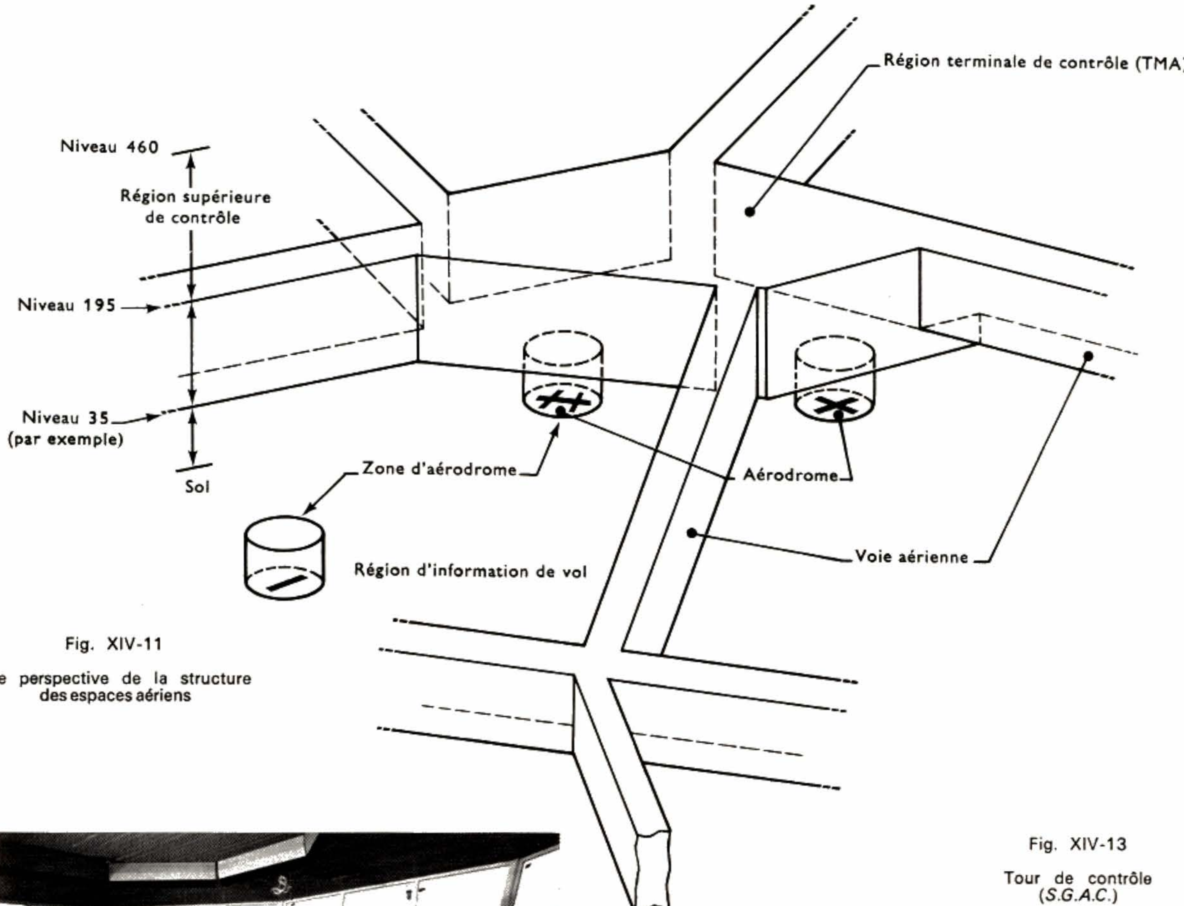


Fig. XIV-11

Vue perspective de la structure des espaces aériens



Fig. XIV-12 — Vue intérieure de la vigie d'une tour de contrôle (*S.G.A.C.*)



Fig. XIV-13

Tour de contrôle (*S.G.A.C.*)

2.2.4. Les services de la navigation aérienne. — L'O.A.C.I. a défini trois services : le contrôle, l'information de vol et l'alerte.

Le second est moins complet que le contrôle et s'en distingue par un partage différent des responsabilités entre contrôleurs au sol et commandant de bord. Le service d'alerte a pour but de déclencher les phases d'urgence et de détresse à partir desquelles le service SAR intervient. Nous nous attacherons essentiellement au service de contrôle.

Celui-ci est pratiqué, d'une part, à partir des tours de contrôle d'aérodromes (fig. XIV-12 et XIV-13) au profit des vols en phase d'approche, d'atterrissage, de décollage et des mouvements sur les aires de manœuvre, d'autre part, à partir des centres de contrôle régional (trois en France, à Paris-Orly, Marseille-Aix-en-Provence, et Bordeaux-Mérignac) au profit des vols en route. L'espace aérien mondial est divisé géographiquement en régions d'information de vol (FIR) ; la FIR-Paris comprend, par exemple, toute la moitié Nord de la France, ainsi que des étendues maritimes jusqu'au milieu de la Manche, et sur l'Atlantique, jusqu'au méridien 8° W.

À l'intérieur des limites d'une FIR, un Centre de contrôle régional (C.C.R.) est responsable de la fourniture du service de contrôle dans les espaces contrôlés, mais rend aussi les deux autres services dans tout l'espace. La FIR est partagée en secteurs de contrôle, unités dans chacune desquelles un contrôleur principal et ses assistants prennent en compte tous les mouvements qui la traversent.

Il s'agit en fait des mouvements de la circulation aérienne générale (C.A.G.) qui s'opposent à la circulation opérationnelle militaire (C.O.M.) dont les vols sont traités suivant des procédures spéciales par des centres de contrôle militaires. Pour assurer la compatibilité de ces deux circulations, il est nécessaire de coordonner les actions des contrôleurs. Cela se fait par un échange permanent d'informations au sol.

Le C.C.R. de Paris traite un trafic important par rapport à la moyenne de celui des FIR du monde : 588 000 mouvements en 1970, 800 000 prévus en 1975.

2.2.5. Les services de télécommunications. — Le contrôle de la navigation aérienne et les autres services rendus aux aéronefs reposent sur d'importants échanges de communications. On classe les services des télécommunications comme suit :

1° *Service fixe.* — Il consiste en l'échange d'informations sol-sol et comporte :

— le réseau du service fixe des télécommunications (R.S.F.T.A.), réseau télégraphique mondial qui permet de transmettre par téléimprimeurs tous les messages écrits entre organismes de la circulation aérienne, principalement les plans de vol ;

— les liaisons téléphoniques directes entre contrôleurs ;

— un réseau européen télégraphique spécial faisant circuler les données météorologiques relatives au temps sur les aérodromes (réseau M.O.T.N.E.) ;

— des liaisons entre calculateurs permettant l'échange de données codées, digitalisées, ainsi que les retransmissions des informations digitalisées des radars sous une forme similaire.

2° *Service mobile.* — On appelle ainsi les communications entre les organismes au sol et les aéronefs. La radiotéléphonie dans la gamme de fréquences HF (2-27 MHz) est encore utilisée pour les liaisons lointaines (Atlantique, par exemple), mais c'est essentiellement la communication directe pilote-contrôleur en radiotéléphonie V.H.F. (118-136 MHz) qui est utilisée par les organismes de contrôle.

3° *Service de diffusion.* — Ce sont des émissions radio, surtout dans la gamme d'ondes V.H.F., faites à tous et qui comportent les renseignements météorologiques relatifs aux aérodromes (VOLMET).

4° *Service de radionavigation.* — On englobe sous ce terme deux notions finalement assez différentes :

— le guidage par les signaux de radiophares reçus à bord dans des récepteurs spéciaux (V. § 2.3) ;

— la radiolocalisation au moyen de radars et, dans quelques années, de satellites, qui permet d'assurer la surveillance du déroulement réel des vols par les services au sol.

2.3. Les moyens de la navigation aérienne

2.3.1. Les aides à l'approche et à l'atterrissage. — Les mauvaises conditions météorologiques ou de visibilité imposent l'utilisation de radiophares et de balisages lumineux pour que l'avion puisse rejoindre l'aéroport et atterrir. Les aides à l'approche, qui permettent de suivre la trajectoire voulue suivant une procédure préétablie et éventuellement de « percer » (passer sous la couche de nuages) avant de terminer à vue, sont des mêmes types que pour la navigation en route, quoique souvent de portée réduite : radiobalises M.F. (*locator*), V.O.R., D.M.E. (V. § 2.3.2).

L'approche finale et l'atterrissage sont généralement radioguidés sur un axe de descente rectiligne grâce au système ILS. Ce système (fig. XIV-14) comporte au sol un radiophare d'alignement de piste (*localizer*) installé en aval de la piste et un radiophare d'alignement de descente (*glide path*) installé sur le côté, au voisinage de l'entrée de piste. Leurs signaux, reçus dans des récepteurs spéciaux à bord, matérialisent deux plans à l'intersection desquels l'avion doit chercher à se maintenir sur les 10 ou 15 derniers kilomètres de son approche : l'un, vertical, est aligné sur la piste ; l'autre, passant sensiblement par le point d'impact, a une pente voisine de 2,5°. Cette installation est complétée par deux ou trois radiobornes à rayonnement vertical placées sur l'axe d'approche, qui donnent des marques de distances. En France, près de quarante aérodromes sont équipés d'ILS et ce système d'aide tend à se généraliser.

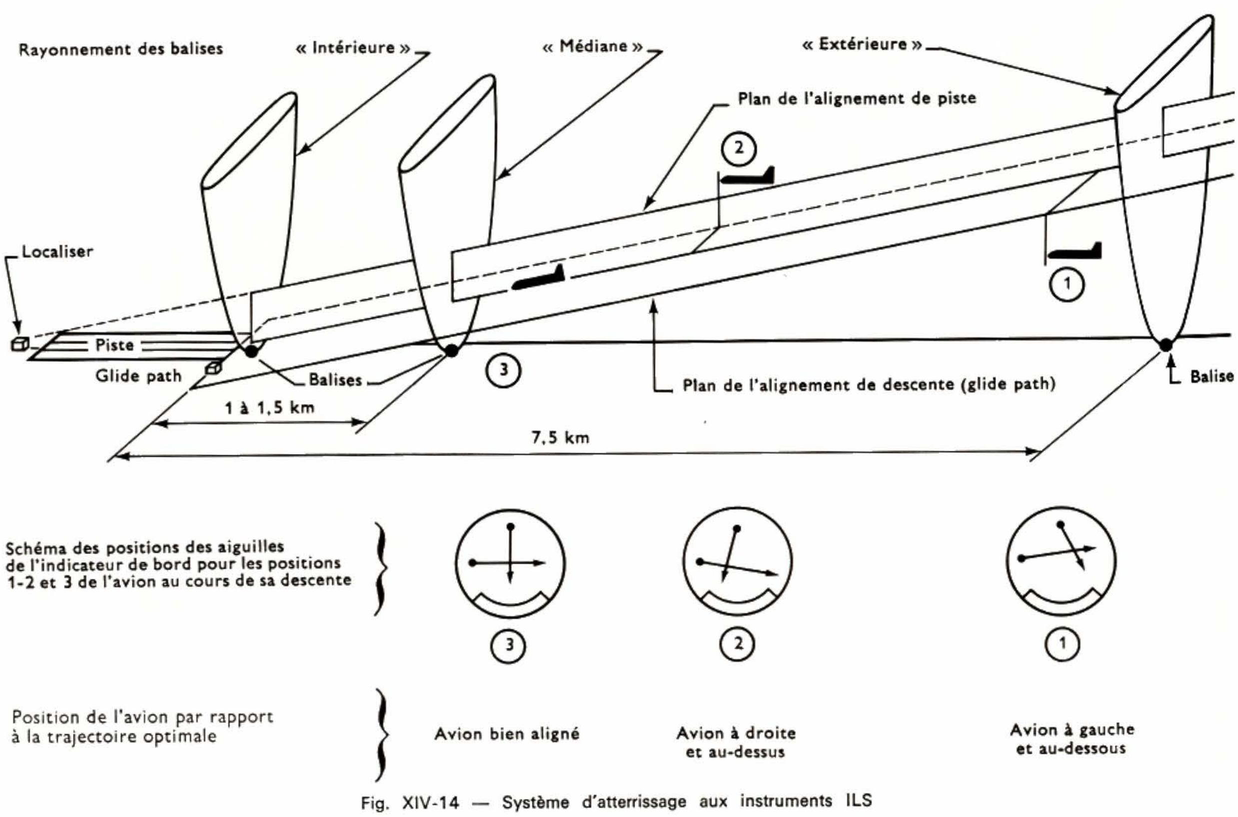


Fig. XIV-14 — Système d'atterrissage aux instruments ILS

Le radar d'approche de précision PAR répond au même besoin par une conception très différente : c'est un radar à double balayage qui permet à un contrôleur au sol de déceler les écarts de l'avion par rapport aux deux plans d'alignement et de descente et de donner par radio, au pilote, les corrections à effectuer. Ce moyen n'est presque plus utilisé sur les aérodromes civils.

Les aides radioélectriques sont complétées par les balisages lumineux qui donnent au pilote la référence visuelle dont il a besoin. En approche finale, l'ensemble des feux d'approche et de piste permet de restituer par mauvaise visibilité la géométrie de la piste et donne une vue perspective qui indique si la présentation est bonne. Il existe aussi des indicateurs visuels de pente d'approche qui, par un code de couleurs ou de brillances, font savoir au pilote s'il est au-dessus ou au-dessous du plan de descente.

L'évolution de l'ILS et des aides visuelles a permis d'abaisser progressivement les « minimums » météorologiques, c'est-à-dire les valeurs caractéristiques de la visibilité et du plafond de nuages qui sont nécessaires pour terminer à vue l'atterrissage. Pour les approches dites de précision, on a défini internationalement trois catégories de minimums, fonction de l'importance et de la précision des équipements :

— la catégorie I, pour laquelle la hauteur de décision, hauteur à laquelle le pilote doit s'assurer qu'il peut poursuivre ou non son approche et son atterrissage avec des références visuelles, est de 60 mètres et la portée visuelle de piste (visibilité horizontale dans l'axe) est au moins de 800 mètres ;

— la catégorie II, pour laquelle la hauteur de décision est de 30 mètres et la portée visuelle de piste d'au moins 400 mètres ;

— la catégorie III, sans hauteur de décision, elle-même subdivisée en IIIa, IIIb, IIIc, caractérisées par des visibilités limites respectivement supérieures à 200 mètres, à 50 mètres et nulles.

Dans la pratique, on peut aller jusqu'à un atterrissage par visibilité quasi nulle, avec un ILS de performances convenables et un système automatique à bord mettant en jeu les récepteurs ILS, une sonde radio-électrique de haute précision et le pilote automatique. L'atterrissage automatique est au point en France où il est pratiqué sur quelques aérodromes.

2.3.2. Les aides radioélectriques de route. — Le dispositif radioélectrique le plus simple pour se situer sur

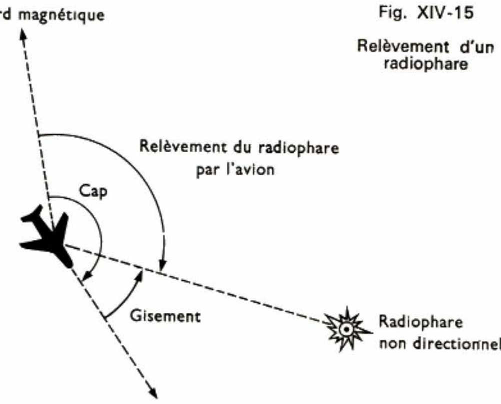


Fig. XIV-15

Relèvement d'un radiophare

un lieu de position est de recevoir dans un radiocompas, à bord, récepteur à antenne à cadre directive mobile, le signal d'un radiophare non directionnel en gamme de fréquences M.F. On obtient ainsi le gisement de la station par rapport à l'avion, qui, combiné avec le cap, donne le relèvement (fig. XIV-15). Le moyen manque malheureusement de portée et de précision.

Un procédé, utilisé principalement par l'aviation légère, est la radiogoniométrie en bande V.H.F. : une simple émission à bord permet d'obtenir au sol le relèvement de l'avion grâce à une antenne capable de repérer la direction de l'onde émise.

Pour la navigation à grande ou moyenne distance, notamment sur les étendues maritimes, divers systèmes sont ou ont été employés : radiophare Consol, systèmes à plusieurs stations donnant la position par recoupement de deux ou trois lieux de position hyperboliques : Decca, Loran, Omega. De plus en plus, sur les longs parcours et loin des zones continentales à fort trafic, les exploitants ont recours à des moyens de navigation autonomes qui intègrent la distance parcourue : radars Doppler de bord et surtout plates-formes à inertie.

Dans les régions continentales où les routes aériennes sont nombreuses, on a recours à deux sortes d'aides qui balisent ces routes, les V.O.R. et les D.M.E. (fig. XIV-16).



Fig. XIV-16 — Station V.O.R.—D.M.E. (*S.G.A.C.*)

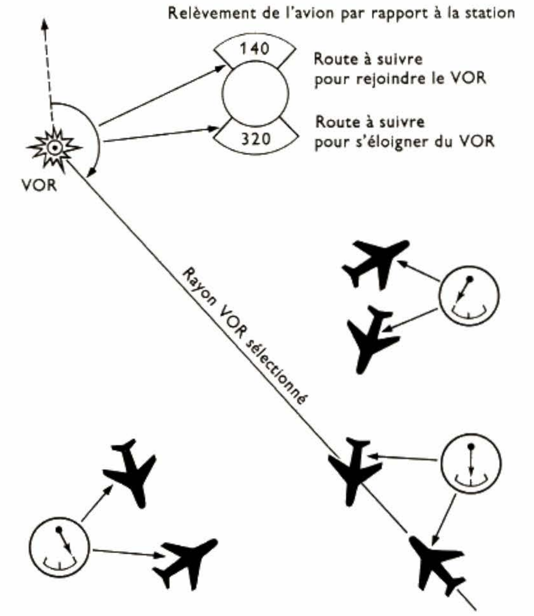


Fig. XIV-17 — Indications données à bord par le récepteur V.O.R.

Le V.O.R. (radiophare omnidirectionnel en bande V.H.F.: 108-118 MHz) dont les signaux sont reçus dans un récepteur spécial à bord, indique le relèvement de l'avion (fig. XIV-17). On en compte une cinquantaine en France. Il est parfois complété par une radiobalise « mesureur de distance » D.M.E. qui est, en fait, un répondeur interrogé par l'appareil de bord ; il fonctionne par impulsions codées, dans la bande décimétrique U.H.F. (environ 1 000 MHz) et c'est le temps aller-retour des impulsions à la vitesse des ondes électromagnétiques qui donne la distance. Le radiophare militaire Tacan est d'un principe identique.

La procédure de navigation sur V.O.R.-D.M.E. telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui consiste à suivre uniquement des segments de route radiaux passant par la verticale de la station V.O.R.; c'est une navigation dite par « homing ». La tendance actuelle, déjà partiellement concrétisée aux États-Unis d'Amérique, est d'introduire la pratique d'une navigation dite de « surface » dans laquelle les routes permises ne passent plus obligatoirement par la verticale des stations V.O.R.-D.M.E. Pour suivre de telles routes, il faut à bord un équipement assez évolué, par exemple, un calculateur transformant les coordonnées polaires liées à un V.O.R.-D.M.E. en coordonnées géographiques.

2.3.3. Les radars. — Le radar est un moyen de surveillance mis à la disposition du contrôleur de la circulation aérienne et non du pilote. Étant donné son importance, un chapitre sera consacré à son étude (V. chap. 13).

Brièvement rappelé, le principe du radar est le suivant: des impulsions électromagnétiques, portées par une onde à ultra-haute fréquence (souvent dans les 1 300 MHz, soit 23 cm de longueur d'onde), sont émises par l'antenne tournante extrêmement directive de la station au sol; le temps aller-retour mis par ces impulsions réfléchies par l'obstacle métallique que constitue l'avion permet de connaître la distance de celui-ci, tandis que la directivité du faisceau en localise l'azimut. Le résultat apparaît sous forme d'un plot lumineux, ou écho, sur un écran cathodique donnant une vision panoramique de la région. Le moyen décrit ci-dessus est appelé radar primaire. Il souffre, du point de vue du contrôle de la circulation aérienne, de plusieurs imperfections: échos d'obstacles fixes (*relief*) et échos parasites; de plus, l'identification de l'avion correspondant à un plot est une charge délicate pour le contrôleur.

L'aviation fait appel au radar secondaire (SSR), système dans lequel l'avion n'est plus un réflecteur passif mais porte un répondeur actif ou transpondeur, composé d'un récepteur et d'un réémetteur. Dans ce cas, un codage particulier des impulsions du radar à l'aller permet de déclencher la réponse du transpondeur et le codage des impulsions au retour apporte un message relatif à l'identité et à l'altitude de l'avion. Le décodage élémentaire de cette réponse se traduit par l'affichage d'un symbole sur l'écran.

Mais ces informations brutes font l'objet d'un traitement en plusieurs phases: *l'extraction*, dans laquelle on isole le plot des échos parasites, ainsi que le message qui lui est associé, le tout étant mis sous une forme digitalisée assimilable par les systèmes d'informatique; *la poursuite* qui consiste à associer les plots obtenus, tour d'antenne après tour d'antenne, ce qui permet de conserver, dans les mémoires des calculateurs, une piste pour chaque avion; *le rapprochement* entre les pistes radar et les informations « écrites » introduites dans les mémoires d'un calculateur telles que l'identité (indicatif d'appel radiotéléphonique) et les intentions de vol (route, niveaux) d'un avion répondant sur un code SSR donné. Ainsi, est fournie au contrôleur, sur écran cathodique, une image de la situation entièrement synthétique sur laquelle les avions sont représentés par des plots symboliques associés à une étiquette comportant des lettres et des chiffres (l'indicatif d'appel, le niveau, etc.).

2.3.4. Techniques futures. — Malgré tous leurs perfectionnements, les moyens actuels de communication, de navigation, de traitement des informations, souffrent parfois encore de limitations soit sur le plan technique, soit dans leur utilisation (non fiabilité des transmissions H.F. à longue distance, portée limitée des radars).

Pour dépasser ces difficultés, un projet utilisant en relais des satellites géostationnaires mis sur orbite à 36 000 km du centre de la Terre, pour assurer en même temps les fonctions de communication et de localisation, est à l'étude sur le plan international; la France a pris une part très active à son élaboration. Dans ce projet, la distance sera mesurée par le temps mis par le signal radioélectrique sur le trajet aller-retour: station terrestre — satellite — avion. Deux satellites suffiront à couvrir l'Atlantique Nord.

Une autre technique prometteuse pour la fin de l'actuelle décennie est l'emploi de transmissions de données codées entre le sol et l'avion (système dit *data-link*). Elle permettra des vitesses de transmission de l'information beaucoup plus grandes qu'avec la radiotéléphonie; ordres de service (choix des codes, des fréquences,) et informations d'état (vitesse, altitude, etc.) seront échangés directement entre les calculateurs des centres et de l'avion. Le système par satellites fera appel à cette technique.

2.4. Le fonctionnement du contrôle moderne. — Les moyens qui viennent d'être présentés permettent maintenant d'envisager de façon globale le fonctionnement du contrôle. Son aspect le plus caractéristique se rencontre dans le contrôle en route, pratiqué dans les C.C.R.

Avant son départ, le pilote remplit un document, appelé plan de vol (PLN), qui précise les intentions du pilote quant à la route à suivre et les niveaux choisis pour le vol et donne les informations utiles aux différents centres de contrôle (fig. XIV-18 et XIV-19) qui l'auront successivement en charge (type de l'avion, indicatif d'appel, etc.). Ces données tirées du PLN sont transmises au contrôleur sous forme d'un ruban de papier de 30 cm de long, le *strip*; le contrôleur portera au crayon sur ce strip des indications corrigées en fonction du déroulement réel du vol. En France, le strip est imprimé directement par un téléimprimeur spécial, organe périphérique d'un calculateur qui a sélectionné les informations utiles au contrôleur d'un secteur donné et a effectué le calcul des heures de passage aux points de report.

Le contrôle consiste, à partir des intentions initiales du commandant de bord, à donner des autorisations de cheminement qui évitent les risques d'abordage avec les autres avions et à surveiller le déroulement réel du vol pour recaler éventuellement les autorisations. Ce déroulement réel est appréhendé par les reports de position que fait le pilote en radiotéléphonie et par la surveillance au radar. L'application par le contrôleur de normes de séparation entre deux avions: soit un intervalle de temps entre les deux passages au même point, soit une distance spécifiée, permet d'éviter les collisions.

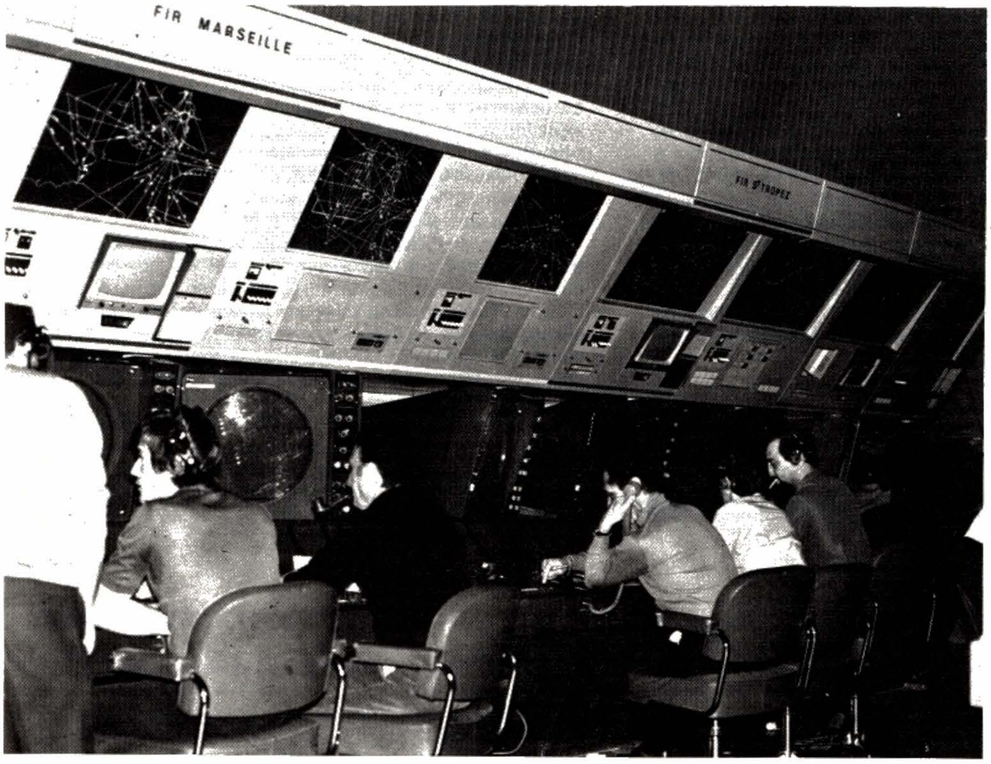
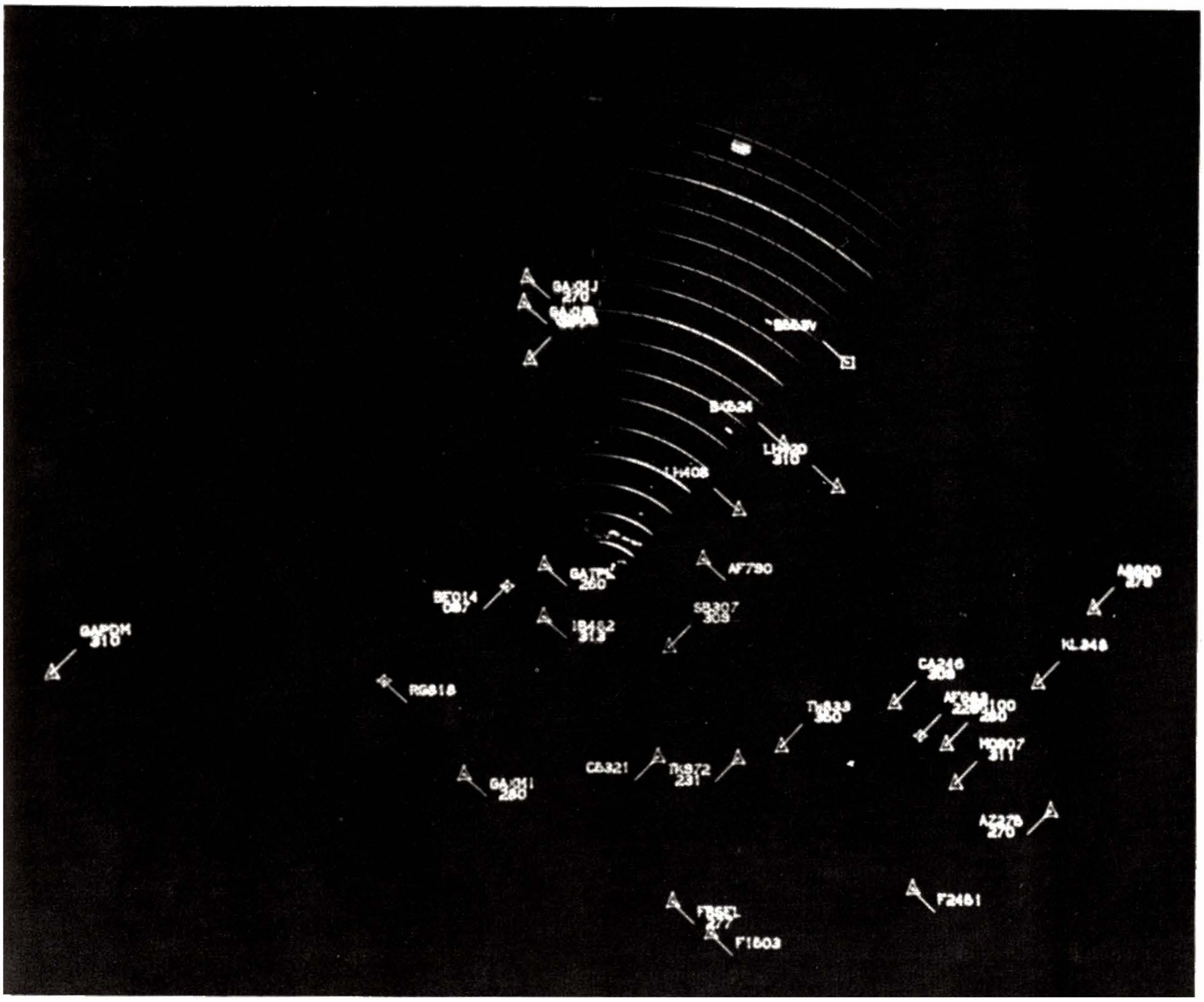


Fig. XIV-18

Vue intérieure de la salle de contrôle d'un C.C.R. (*S.G.A.C.*)

Fig. XIV-19

Vue d'un écran radar sur une position de contrôle de C.C.R. (*S.G.A.C.*)



Aujourd'hui le contrôle dans un C.C.R. français est très largement automatisé. On appelle CAUTRA le système d'informatique des C.C.R. français, basé sur de puissants ordinateurs. Des informations provenant des trois sources fondamentales dont dispose le contrôleur : plan de vol ; radiotéléphonie, radar, seule la radiotéléphonie échappe, en l'état actuel des choses, au filtrage du calculateur. On a vu en effet que le CAUTRA traitait les données des PLN, les données des radars, et même établissait une corrélation entre les deux. À partir de ce niveau d'automatisation, déjà en service, l'étude de la détection, par le calculateur, de conflits potentiels est très avancée, le rôle du contrôleur étant de les résoudre par la délivrance d'autorisations appropriées. Le CAUTRA facilite l'échange des informations entre contrôleurs qui vont avoir successivement le même vol dans leurs secteurs contigus.

2.5. Les actions de coordination. — La mise en œuvre des services de la navigation aérienne entraîne des dépenses considérables. De plus, elle nécessite une normalisation et une planification à l'échelle internationale. Aussi des États se sont-ils fréquemment regroupés dans des organismes ayant pour rôle soit de mener des études en commun, soit d'établir un financement communautaire, soit même d'organiser l'exploitation. En dehors de l'O.A.C.I., organisme spécialisé de l'O.N.U. dont on a vu le rôle, sept pays d'Europe occidentale, dont la France, ont établi une agence, Eurocontrol, en vue de préparer des plans, de financer les installations et, dans certains cas, d'exploiter des centres de contrôle, sur une base communautaire, pour tout ce qui a trait à l'espace situé au-dessus du niveau de vol 250. Les États francophones d'Afrique noire ont également formé ensemble une agence, l'A.S.E.C.N.A.

D'autres problèmes importants se rencontrent, presque toujours dans un cadre national, en ce qui concerne la coordination des circulations aériennes civile et militaire. L'harmonisation de la mise en œuvre des équipements au sol et à bord va de pair avec ces problèmes, dans un but bien évident d'économie globale pour la nation. En France, ces préoccupations ont conduit, tout au début de 1972, le gouvernement à instituer un délégué à l'Espace aérien, haut fonctionnaire placé auprès des deux ministres responsables respectivement de l'Aviation civile et de la Défense nationale, qui forme un directoire avec les deux directeurs disposant des services dans chacune des deux administrations.

CHAPITRE XV

L'AVIATION COMMERCIALE

1. NOTIONS GÉNÉRALES

1.1. Le droit aérien en matière d'aviation commerciale. — On ne peut aisément saisir les aspects particuliers du développement du transport aérien, les causes qui l'ont favorisé, les obstacles qu'il a rencontré, ainsi que les affrontements entre les tenants du transport régulier et les exploitants du transport non régulier sans se référer aux notions essentielles du droit aérien.

1.1.1. Les droits de trafic. — L'aviation commerciale est née le 8 février 1919 avec la création du premier service Paris-Londres. Dès cette année, les puissances alliées reconnurent la nécessité de réglementer la circulation aérienne internationale et signèrent la Convention de Paris, qui reconnaissait à chaque État la souveraineté complète et exclusive sur son espace aérien et subordonnait la création de lignes régulières d'aviation à l'accord préalable des pays desservis ou *survolés*.

Ainsi, contrairement au trafic maritime, dont le principe fondamental est la liberté des mers, le transport aérien s'est vu soumis dès l'origine à un régime d'autorisation préalable.

Dès avant la fin du deuxième conflit mondial, et en prévision du développement que ne manquerait pas d'avoir l'aviation commerciale, compte tenu des progrès énormes réalisés sur le plan du matériel volant, les États-Unis d'Amérique provoquèrent la réunion d'une conférence internationale qui aboutit à la signature de la Convention de Chicago (décembre 1944).

La Convention réaffirme le principe de la souveraineté des États sur leur espace aérien, édicte des mesures propres à faciliter la navigation aérienne, pose les principes d'une uniformisation des règlements et procédures relatives au personnel et aux routes aériennes et crée un organisme international de l'aviation civile l'O.A.C.I. (V. § 4.1). Sur le plan de la libéralisation du transport aérien commercial son apport reste toutefois limité. La convention a introduit une distinction entre le transport effectué par des services réguliers, c'est-à-dire permanents et avec des horaires préétablis (transport régulier) et le transport effectué en dehors de ces services (transport non régulier). Ces deux sortes de transport bénéficient sans restrictions des deux premières libertés de l'air: droit de survol (première liberté), droit d'atterrissage pour des raisons non commerciales (deuxième liberté). En revanche, en ce qui concerne les libertés commerciales: droit de débarquer (troisième liberté) ou d'embarquer (quatrième liberté) des passagers, du fret ou de la poste, le transport non régulier est libre, sauf réglementation contraire de l'État desservi, alors que le transport régulier est soumis à autorisation de l'État desservi.

Pour le transport régulier, la troisième liberté, la quatrième liberté et la cinquième liberté (droit pour la compagnie d'un État de débarquer ou d'embarquer son chargement sur le territoire d'un autre État, à destination ou en provenance d'un tiers État) doivent donc faire l'objet d'accords bilatéraux, pays à pays.

La majeure partie de ces accords se réfèrent aux « principes des Bermudes », principes de compromis entre le libéralisme des États-Unis d'Amérique et la position restrictive des Britanniques en matière de capacité à mettre en service sur chaque relation aérienne, adoptés dans l'accord bilatéral entre les États-Unis d'Amérique et la Grande-Bretagne en février 1946 aux Bermudes, à savoir:

— les services aériens doivent être en rapport étroit avec les besoins du public;
— égalité de chances entre les transporteurs des deux nations;
— capacité adéquate des services aux besoins du trafic entre le pays du transporteur et le pays de destination finale du trafic;
— réglementation du trafic de cinquième liberté, qui doit aider à l'équilibre de l'exploitation des lignes long-courriers, mais sans porter atteinte aux services locaux et régionaux;
— exclusion de tout principe de prédétermination des capacités et des fréquences;
— pas de fixation des tarifs, celle-ci étant confiée à l'I.A.T.A. (association internationale des transporteurs aériens).

Avant 1972, la France avait déjà signé quatre-vingt-sept accords bilatéraux, dont la plupart sont du type bermudien. Certains s'écartent des principes rappelés ci-dessus, lorsqu'ils sont conclus avec des États ayant une aviation internationale modeste qu'ils veulent protéger. Ces derniers accords comportent alors des clauses de capacité (taille des appareils à mettre en œuvre) et de fréquence (nombre de services assurés chaque semaine).

1.1.2. Autres conventions internationales multilatérales, en matière de transport aérien. — La Convention de Varsovie (octobre 1929) a établi les normes d'établissement des titres de transports internationaux (billets pour les voyageurs et lettres de transport aérien pour le fret) et surtout limité (sauf cas de faute volontaire) la responsabilité des compagnies aériennes envers les passagers ou les expéditeurs des marchandises transportées. La limitation pour les passagers était de 125 000 francs-or. Au fur et à mesure que la sécurité aérienne s'affermissait, la limitation de responsabilité des compagnies est apparue trop restrictive. En septembre 1955, le protocole de La Haye en a doublé le montant. En mars 1971, le protocole du Guatemala a adopté le principe de la responsabilité objective (et non plus basé sur la notion de faute) du transporteur et élevé la limite de responsabilité par passager à la contrevaleur de 550 000 francs.

La Convention de Rome (octobre 1952) a fixé les règles internationales applicables en matière de dommages causés au sol par des aéronefs étrangers.

La Convention de Tokyo (septembre 1963) s'applique aux infractions commises à bord des aéronefs en vol ainsi qu'aux actes pouvant compromettre la sécurité des personnes ou de l'aéronef. Elle a été suivie de la Convention de La Haye (décembre 1970) sur la répression des détournements illicites d'aéronefs et de la Convention de Montréal (septembre 1971) sur les cas de sabotage d'aéronefs.

1.2. Évolution du transport aérien. — Aucune industrie du transport n'a connu un si grand rythme de croissance que le transport aérien. Après avoir pratiquement rayé des mers le transport des passagers, l'aviation commerciale règne sans conteste sur toutes les relations supérieures à 1 000 km et lutte âprement avec les autres moyens de transport sur les relations comprises entre 200 et 1 000 km.

Il importe de fixer quelques étapes de ce développement.

Le tableau ci-dessous retrace l'évolution du trafic des passagers sur les vols réguliers des compagnies des pays membres de l'O.A.C.I. (U.R.S.S. exclue) en faisant ressortir les progrès réalisés chaque décennie, depuis 1929 (première année de statistiques fiables).

À titre indicatif, il fait état des prévisions pour l'année 1979, basées sur un taux annuel d'augmentation du trafic passagers de 12 %, retenu par nombre d'experts, et applicable au nombre de passagers-kilomètres.

à multiplier par 4 le trafic de 1970. Il faut toutefois compter avec le développement du trafic maritime des marchandises en conteneurs qui devrait freiner le passage des marchandises de la voie maritime à la voie aérienne. Aussi doit-on considérer comme utopiques les vues de spécialistes américains qui envisagent qu'en 1980-1985 le trafic du fret serait aussi important en tonnage que le trafic des passagers (en 1970 il n'en représentait que le tiers).

Le développement du transport aérien dépend à la fois de la conjoncture économique (et en particulier de l'élévation du niveau de vie) et des progrès techniques réalisés en matière de construction aéronautique qui se traduisent en règle générale par un abaissement des prix de revient, et partant, des tarifs.

Les étapes successives qui figurent dans le tableau ci-après peuvent être illustrées par un bref rappel des caractéristiques des appareils employés à ces diverses périodes :

1929 : appareil Farman « Jabiru » employé en France, monomoteur de 500 ch (350 kW), vitesse de croisière 190 km/h, 8 passagers, masse totale en charge 3,3 t.

1939 : Douglas DC 3, bimoteur de 2 400 ch (1 760 kW) de puissance totale, vitesse de croisière 250 km/h, 21 passagers, masse totale en charge 12 t.

1949 : Lockheed « Constellation », quadrimoteur de 10 000 ch (7 350 kW) de puissance totale, vitesse de croisière de 500 km/h, 46 passagers, masse totale en charge 48 t.

Années	Nombre de passagers (en millions)	Parcours moyen (en kilomètres)	Nombre de passagers-km (PKT) (en milliards)	Pourcentage annuel d'augmentation des PKT, au cours de chaque période
1929	0,4	420	0,17	
1939	3,4	600	2,03	28,2 %
1949	27,00	880	24,00	28 %
1959	99,00	990	98,00	15,1 %
1969	290,00	1 200	349,00	13,6 %
Prévisions 1979	770,00	1 400	1 080,00	12 %

Le trafic de fret a connu, lui aussi, un développement spectaculaire puisque de 110 millions de tonnes-kilomètres en 1945 (première année statistique) il passait en 1970 à 10,8 milliards de tonnes-kilomètres, ayant ainsi centuplé en 25 ans. Pour les dix prochaines années on envisage un taux de croissance de 15 % l'an, ce qui conduit

1959 : Boeing 707, quadriréacteur d'une poussée totale de 23 000 daN, vitesse de croisière 820 km/h, 130 passagers, masse totale en charge 134 t.

1969 : Boeing 747, quadriréacteur d'une poussée totale de 78 920 daN, vitesse de croisière de 840 km/h, 350 passagers, masse totale en charge 322 t (fig. XV-1).



Fig. XV-1 — Boeing 747 en fin de décollage (*Air France*)

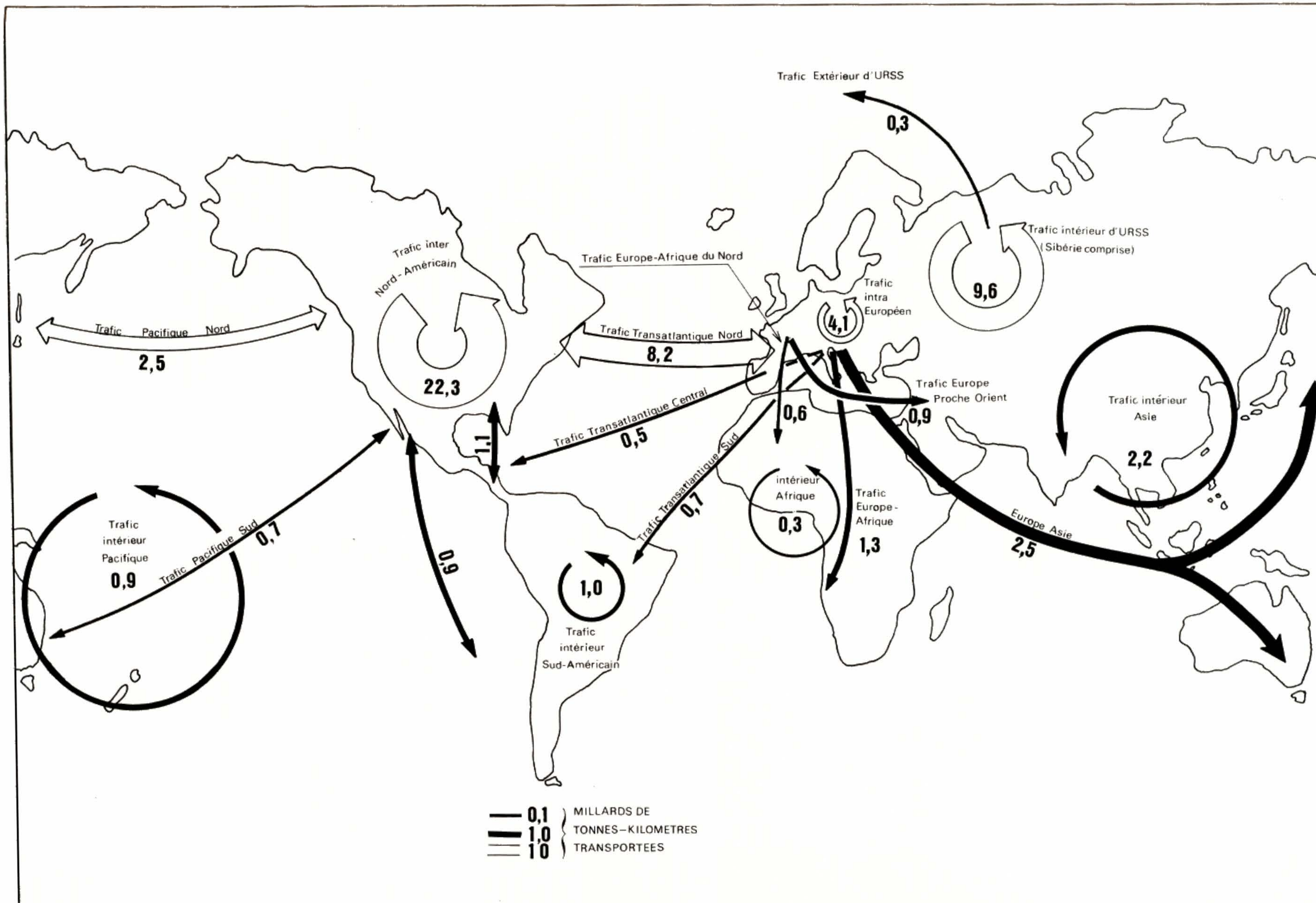


Fig. XV-2 — Principaux courants de trafic aérien en milliards de tonnes-kilomètres transportées en 1973

L'amélioration des caractéristiques de capacité et de vitesse des appareils ont permis un abaissement des prix de revient du siège-kilomètre offert, de 2 % par an, à monnaie constante. Depuis l'introduction des appareils à réaction, les prix de revient avaient diminué à un rythme supérieur puisque entre 1960 et 1968 le coût à la tonne-kilomètre transportée est passé de 0,410 à 0,305 dollar. Mais cette tendance s'est inversée depuis et en 1971 le coût précédent a atteint 0,347 dollar. Le transport aérien est en effet une industrie de main-d'œuvre (40 % du coût total) de très haute spécialisation, et les gains de productivité des appareils risquent de n'être plus suffisants pour compenser l'élévation des coûts de main-d'œuvre. Jusqu'à ces dernières années, l'augmentation de taille des appareils entraînait des économies spectaculaires. Il n'en est plus tout à fait de même avec les nouvelles générations d'appareils gros porteurs. De plus, de nombreuses charges d'exploitation, qui étaient assurées gratuitement ou en dessous du prix de revient par les États, sont progressivement transférées aux compagnies (aides à la navigation aérienne, installations aéroportuaires).

Il apparaît donc que les taux de croissance futurs du transport aérien s'avéreront moins élevés que par le passé.

1.3. Le trafic régulier : les grandes routes mondiales aériennes ; importance du trafic intérieur américain. — Le trafic régulier mondial, pour les 120 États membres de l'organisation de l'Aviation civile internationale, U.R.S.S. comprise, s'est élevé en 1971 à 60,6 milliards de tonnes-kilomètres transportées. La carte (fig. XV-2) marque quelle a été la répartition de ce trafic sur les grandes routes mondiales intercontinentales, d'une part, sur les relations intérieures à ces continents, d'autre part.

Le transport intérieur des États-Unis d'Amérique représente plus de 34 % du trafic mondial. Le trafic intérieur de l'U.R.S.S. n'atteint que 9,5 milliards de tonnes-kilomètres mais est en très sensible progrès d'une année sur l'autre. Le trafic intereuropéen, qui comprend le trafic intérieur des différents États, apparaît relativement faible (7 % du trafic mondial) à côté des deux ensembles précédents, mais il convient de souligner la relative proximité des centres économiques européens entre eux, qui justifie des échanges intenses soit par route, soit par fer.

Les échanges intercontinentaux ont représenté 19,9 milliards de tonnes-kilomètres en 1971, soit moins du tiers du trafic mondial. La route de l'Atlantique Nord revêt une importance primordiale, mais la route du Pacifique Nord essentiellement axée sur les échanges entre les États-Unis d'Amérique et le Japon dépasse déjà les 2,5 milliards de tonnes et rejoint ainsi, en volume transporté, l'axe Europe-Extrême Orient-Australie qui fut longtemps la seule liaison intercontinentale aérienne assurée de bout en bout.

1.4. Le trafic non régulier ou trafic « charter »

1° *Définition.* — Le terme « transport non régulier » recouvre plusieurs catégories de services. On distingue actuellement quatre sortes de transport non régulier :

— affrètement d'un appareil à une compagnie régulière ou non régulière pour un transport dit « pour compte propre » ou « affrètement privé » effectué par une entreprise ou une société au bénéfice exclusif de ses employés ou de ses agents ;

— affrètement d'un appareil pour le transport d'un groupe de passagers appartenant à une communauté organisée quelconque (association, club, confrérie) à condition que cette communauté n'ait pas été constituée pour effectuer des voyages à prix réduits. Ces groupes sont dits *à affinité* ou *bona fide ;*

— affrètement d'appareils par des agences de voyages qui vendent au public des voyages organisés, dont le prix forfaitaire couvre le voyage, l'hébergement, les distractions et les transports de surface des passagers. Le voyage revêt en règle générale la forme d'un circuit comportant plusieurs escales. Ce sont les *inclusive-tours ;*

— affrètement multiple ou fractionné *split charter :* affrètement d'un appareil non plus au bénéfice d'un seul groupe, mais de plusieurs groupes à affinités différentes.

Les caractères communs de ces différents types de transport sont qu'ils ne sont pas offerts directement au public par les transporteurs et que le passager n'est pas libre du choix du jour et de l'heure de son départ.

Les tarifs du transport non régulier sont, à itinéraire semblable, sensiblement inférieurs aux tarifs individuels des lignes régulières, car l'affrètement des appareils à un transporteur lui garantit un coefficient de remplissage de 100 % (contre 50 à 60 % pour le transport régulier) et entraîne des frais de vente et de service aux passagers très réduits.

2° *Historique du trafic non régulier.* — Depuis 1960 le trafic non régulier a connu un développement exceptionnel grâce, en premier lieu, à l'apparition sur le marché de l'occasion des appareils à hélices déclassés par l'arrivée des avions commerciaux à réaction. En outre le gouvernement américain a favorisé le développement du trafic non régulier effectué par des compagnies dites « supplémentals » qui avaient pour premier objet d'effectuer des transports militaires pour les États-Unis d'Amérique, mais dont l'équilibre d'exploitation était assuré par des vols non réguliers de la clientèle civile.

En 1971, on estime le nombre de passagers-kilomètres réalisé par le transport aérien non régulier à 29 % du nombre de passagers-kilomètres du transport régulier. Sur l'Atlantique Nord le volume du transport non régulier a atteint 35 % du transport régulier. Cette proportion s'élève à 80 % en Europe. Il ne faut donc pas s'étonner que le transport non régulier pose certains problèmes aux compagnies régulières car, pour partie, les deux modes d'exploitation s'adressent à une même clientèle. Les compagnies de transport régulier sont tenues à des causes de dépenses que n'encourent pas les transporteurs non réguliers : obligation d'assurer un minimum de vols réguliers en toutes saisons, quel que soit le nombre de passagers à bord des avions, frais de vente élevés, frais de réservation, service à bord de haute qualité, installations au sol permanentes.

Pour lutter plus efficacement avec les compagnies n'effectuant que des vols non réguliers, les compagnies régulières, notamment européennes, ont créé des compagnies « charter » filiales, qui ont souvent une flotte distincte de la compagnie mère, mais utilisent également, selon les disponibilités, des appareils de cette dernière.

3° *Avenir du transport aérien non régulier.* — Il y a évidemment conflit pour les États entre la volonté de protéger l'équilibre financier de leurs compagnies nationales assurant les lignes régulières et leur désir de voir se développer leur industrie touristique et hôtelière. Cela explique les diverses positions prises dans le monde par les autorités aéronautiques et le développement inégal du transport non régulier selon les régions.

Chaque fois que les marchés du transport régulier et du transport non régulier sont assez nettement différents et qu'en tout état de cause les lignes régulières ne pourraient acheminer à l'époque voulue tout le trafic potentiel comme c'est le cas en Europe pour les migrations touristiques Nord-Sud, le trafic non régulier ne peut que croître. À titre d'exemple on peut citer l'exemple de la compagnie danoise Sterling Airways qui est passé de 1962 à 1971 de quelques milliers à 1 800 000 passagers et dispose de quelque trente Caravelle.

Sur les axes où existe un équipement abondant en appareils tel l'Atlantique Nord, les compagnies régulières luttent avec acharnement contre le transport non régulier effectué en dehors d'elles, en pratiquant notamment des transports de groupe à des tarifs très réduits ou en promouvant elles-mêmes, ou par leurs filiales, un trafic non régulier important. Sur ces axes on assiste ainsi à une différenciation de plus en plus marquée entre le trafic d'affaires et le trafic touristique.

1.5. La sécurité aérienne. — Le niveau exact de la sécurité aérienne est généralement mal apprécié du public, du fait du caractère parfois spectaculaire des accidents aériens et de la présentation qui en est faite par les divers moyens d'information. L'accroissement de la capacité des appareils entraîne évidemment un alourdissement du bilan des pertes en cas d'accident.



Fig. XV-3 — Le Nord 262, à turbopropulseurs de faible tonnage (*Air Inter*)

Aussi convient-il de rappeler toutes les précautions prises pour faire de l'aviation un moyen de transport aussi sûr qu'il est rapide. En matière de constructions aéronautiques on multiplie les systèmes de sécurité, en doublant ou même en triplant les principaux circuits hydrauliques et électriques ou les instruments de navigation, en utilisant des procédés de construction des cellules qui permettent à l'aéronef de continuer à voler malgré des ruptures partielles de composants, en développant des moteurs et des réacteurs de plus en plus fiables. En matière d'entretien, des normes draconiennes sont appliquées par les compagnies et la surveillance statistique des incidents permet de prévenir leur retour. En matière de personnel, les méthodes d'instruction et d'entraînement conduisent à mettre les équipages en mesure de faire face aux situations les plus imprévisibles. Les procédures de navigation, les instruments qui concourent à la sécurité en l'air ou à l'atterrissage et au décollage sont sans cesse améliorés. L'augmentation de l'altitude de vol, la navigation aux instruments, l'utilisation de radars de bord, l'atterrissage tous temps, permettent de s'affranchir de la sujétion des phénomènes atmosphériques et d'accroître ainsi la sécurité des vols.

Il ne faut donc pas s'étonner de voir la sécurité du transport aérien augmenter très sensiblement d'année en année. D'après les statistiques de l'O.A.C.I., de 1950 à 1960, le nombre de passagers tués pour 100 millions de passagers-kilomètres s'était abaissé de 1,97 à 0,80 ; il n'était plus que de 0,18 en 1970 (soit un indice de perte 11 fois moins élevé que 20 ans auparavant). À titre de simple comparaison on notera qu'en France, en 1970, le nombre de tués sur la route correspondait à 5,5 pour 100 millions de passagers-kilomètres (soit 30 fois plus que pour le transport aérien). En 1960, on a compté parmi les pays membres de l'O.A.C.I., 33 accidents d'avions commerciaux pour une flotte totale de 5 000 aéronefs, et 873 passagers tués sur 106 millions de passagers transportés. En 1970, 28 accidents d'avions ont été dénombrés pour une flotte de 7 300 appareils, et 700 passagers ont été tués pour 311 millions de passagers transportés (1 sur 444 300).

2. MISE EN ŒUVRE DU TRANSPORT AÉRIEN

2.1. Choix des appareils. — Les compagnies aériennes sont amenées à employer des appareils de type très divers, selon les missions qu'ils doivent assurer et selon leurs conditions de rentabilité.

Si l'on se réfère au mode de propulsion, on constate que les appareils à moteurs à pistons ne sont plus employés que lorsqu'ils sont de très faible capacité (5-6 places au maximum). Le domaine des turbopropulseurs s'étend de l'appareil de 5 à 6 places à celui de 50 places (type Fokker, Dart Herald ou Nord 262, fig. XV-3). Les compagnies renoncent peu à peu, pour des raisons de rentabilité commerciale, aux avions à turbopropulseurs de plus grande taille : Vanguard ou Lockheed Electra. L'appareil à réaction constitue l'essentiel des parcs des grandes compagnies, il va de la catégorie des 50 places à celle des appareils de 400 places, mais déjà s'annoncent des appareils à réaction de moins de 50 places, tel le YAK 40 de l'Aéroflot, le Falcon 20 T de la société Dassault.

Dans une même catégorie d'appareils les compagnies doivent concilier deux impératifs contradictoires : *l'homogénéisation* de la flotte afin d'avoir le moins de types divers pour des questions évidentes de stocks de rechange, de qualification des pilotes ou des équipes d'entretien, *la diversification* afin de pouvoir disposer du type d'appareil correspondant exactement aux différentes catégories de services assurés (avions gros porteurs pour les lignes à trafic dense, avions à faible coût au kilomètre pour les lignes à faible trafic, avions à grand rayon d'action pour les lignes lointaines, avions à courte autonomie pour les lignes courtes ou à escales nombreuses).

Traditionnellement, on distingue deux grandes catégories d'appareils : les appareils long-courriers pour les étapes de 3 000 à 10 000 kilomètres (type DC 8 ou Boeing 707), les appareils moyen-courriers pour les étapes inférieures à 3 000 kilomètres (type Caravelle, DC 9 ou Boeing 727.200). Cette distinction assez rigide, instaurée au temps des appareils à hélices, s'est quelque peu estompée depuis et

l'on trouve maintenant de plus en plus fréquemment des appareils long-courriers sur des étapes moyennes, voire très courtes (par exemple, le Boeing 707 sur Paris—Londres: 365 km). Cela provient du fait que les appareils à réaction des années 1960 sont en partie déclassés et, après réaménagement portant sur le nombre de sièges, peuvent être utilisés dans les conditions économiques satisfaisantes concuremment avec des appareils moyen-courriers.

Depuis 1970 on a vu apparaître une nouvelle catégorie d'appareils, les gros porteurs, ainsi appelés parce que soit en long-courriers, soit en moyen-courriers, ils comportent un nombre de sièges deux à trois fois plus élevé que les appareils antérieurs, de même usage.

La mise en œuvre de ces appareils apporte aux compagnies une économie d'exploitation par effet de taille, mais là aussi les entreprises de transport aérien doivent faire un compromis entre la productivité de ces appareils et la nécessité de maintenir des fréquences suffisantes. Ces compromis se traduisent par des avantages souvent peu significatifs au niveau de l'exploitation, ce qui explique que des appareils de niveau technique équivalent arrivent à se concurrencer lorsqu'il s'agit de rééquiper une compagnie aérienne, alors même que leurs caractéristiques de taille sont forts différentes.

2.2. Les équipages. — Le personnel de bord comprend le personnel navigant technique chargé de la conduite de l'appareil et le personnel navigant commercial chargé de la sécurité et du confort des passagers.

2.2.1. L'équipage de conduite. — La composition et la qualification de l'équipage de conduite sont soumises à des règles strictes par mesure de sécurité, de même que le temps d'exercice de la conduite et des repos à terre.

a) La composition de l'équipage de même que le niveau de qualification requis de chacun de ses membres varient selon le type d'appareil et la catégorie de parcours



Fig. XV-4 — Équipage de conduite: pilote et copilote (*Air Inter*)

réalisé. Dans la réglementation française, tout aéronef de transport aérien doit comporter un équipage d'au moins deux pilotes, sauf dérogation pour certains appareils légers (fig. XV-4). L'un des pilotes exerçant la fonction de commandant de bord doit posséder la qualification et la licence de pilote de ligne pour les appareils de plus de 20 tonnes effectuant un parcours international, et pour les appareils de plus de 60 tonnes effectuant un vol intérieur. Le second pilote (ou les deux pour les appareils de masse inférieure aux limites précitées) doit avoir la licence de pilote professionnel et la qualification de vols aux instruments (qualification IFR) pour les vols exécutés selon les règles de vols aux instruments (la quasi-totalité des vols commerciaux).

La fonction de navigation peut être exercée par un membre quelconque de l'équipage de conduite possédant la licence de navigateur ou celle de pilote si le vol est réalisé sur un parcours balisé radioélectriquement de façon suffisante (V. chap. 14, § 2). Sur les autres parcours, dits parcours A, tels que les océans ou les étendues désertiques, la fonction de navigation devait être exercée jusqu'à ces derniers temps par un membre de l'équipage titulaire de la licence de navigation à l'exclusion de toute autre fonction. La mise en service récente d'installations de « navigation à inertie » à bord des appareils a permis de lever cette contrainte.

La fonction de télécommunications, qui était jusqu'à ces dix dernières années exercée par un membre spécial de l'équipage doté de la licence de radionavigant, peut être maintenant confiée à l'un quelconque des membres de l'équipage possédant la licence correspondante. Les progrès réalisés en matière de télécommunications ont conduit ainsi à la disparition du corps des radionavigants.

La fonction mécanique tend également à ne plus être exercée exclusivement par un membre de l'équipage spécialement désigné (fig. XV-5), sauf dans le cas où l'aéronef est équipé d'un poste spécial de mécanicien.



Fig. XV-5 — Poste de mécanicien navigant (*Air France*)

On s'achemine ainsi vers une interchangeabilité complète des fonctions à bord. Les compagnies américaines utilisent ainsi sur leurs vols internationaux des équipages homogènes de trois pilotes.

Les qualifications des divers membres d'équipage sont vérifiées à intervalles réguliers, au moins deux fois l'an, par des instructeurs des compagnies, agréés par les autorités aéronautiques. En outre, un contrôle en vol est exercé par des pilotes dépendant de l'administration, spécialement affectés à cette tâche.

La licence est renouvelée tous les six mois, sous réserve d'un contrôle médical des aptitudes physiques et de la réalisation d'un nombre minimum d'heures de vol au cours des six mois écoulés. Le personnel technique est soumis en outre à l'obligation d'effectuer un certain nombre d'heures d'entraînement chaque semestre, soit à bord des appareils, soit à terre sur des simulateurs reproduisant les conditions réelles de vol.

b) Le temps d'exercice de la conduite, de même que les intervalles entre deux vols consécutifs et les périodes de repos sont réglementés de façon stricte.

En France, la durée maximale d'un vol sans escale est de 10 heures, la durée totale ou « amplitude » de l'emploi d'un équipage (effectuant par exemple plusieurs étapes) ne pouvant dépasser 14 heures. Les périodes de repos doivent être au moins égales à 11 heures pour les périodes de vols de moins de 6 heures et à 3 ou 4 fois la durée des périodes de travail qui les précèdent, si celles-ci sont supérieures à 6 heures. En outre un séjour minimum à la résidence d'affectation des membres d'équipage est prévu soit chaque semaine pour les moyens parcours soit chaque mois pour les longs parcours.

Enfin le nombre d'heures de vol pour les équipages affectés sur des appareils à réaction est limité à 95 heures

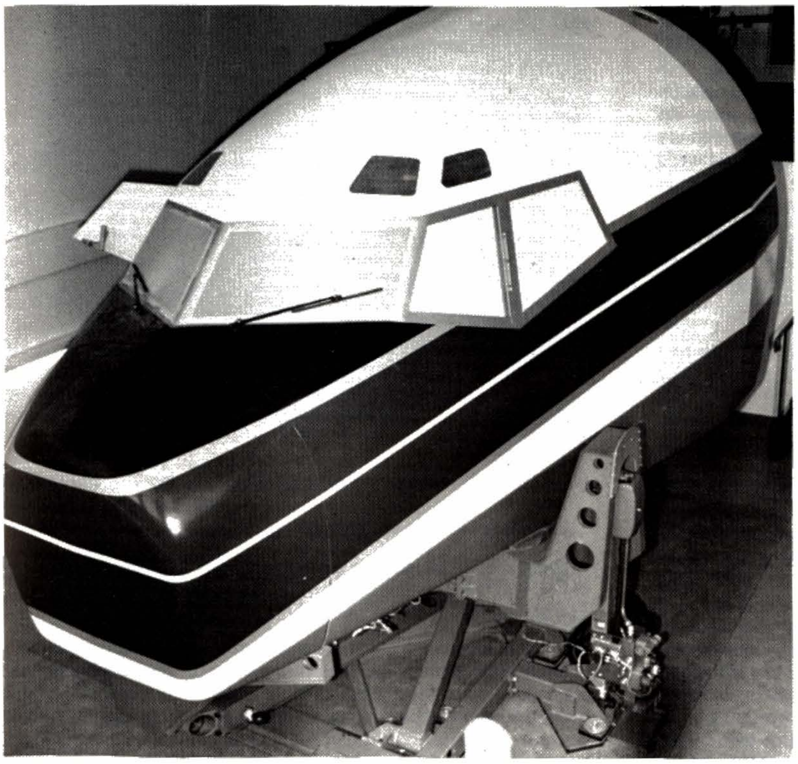


Fig. XV-6

Simulateur de vol
(*Air France*)

pour un mois, 180 heures pour deux mois consécutifs, 265 heures pour trois mois consécutifs et 900 heures pour l'année entière.

c) Pour pouvoir exercer les fonctions de pilote, contre rémunération, le brevet de pilote professionnel est le titre aéronautique minimum exigé. Il permet à son titulaire d'être pilote commandant de bord sur les appareils effectuant du travail aérien et sur les appareils de moins de 5,7 tonnes effectuant du transport aérien, et d'être copilote sur les appareils de transport aérien à hélices et les appareils à réaction de moins de 20 tonnes.

Ce brevet implique des épreuves théoriques et des épreuves pratiques. Ces dernières exigent que le candidat totalise au moins 200 heures de vol dont 100 heures en solo. La plupart de ces heures sont effectuées dans les aéroclubs. Il est généralement complété par la qualification de vol aux instruments, car seule celle-ci permet à son titulaire d'effectuer des vols professionnels autres que les vols à vue.

Le brevet de pilote professionnel de 1re classe constitue le second degré des titres aéronautiques. Il permet à son titulaire d'être copilote à bord de tous les appareils commerciaux, et d'être commandant de bord sur tout appareil de moins de 20 tonnes (60 tonnes sur le territoire métropolitain).

Ce brevet exige que le candidat totalise au moins 700 heures de vol, dont au moins 150 heures de vol en qualité de commandant de bord, et qu'il ait ou qu'il acquière la qualification de vol IFR.

Le brevet de pilote de ligne est le titre aéronautique le plus élevé. Il permet à son titulaire d'exercer les fonctions de commandant de bord sur tous appareils. Le candidat pilote de ligne doit totaliser 1 200 heures de vol dont 250 heures effectuées en qualité de commandant de bord, 100 heures de vol de nuit, 75 heures de vol aux instruments, être titulaire des brevet et licence de pilote professionnel de 1re classe et avoir été employé en cette qualité dans le transport commercial au moins pendant deux ans.

La préparation aux épreuves pratiques du brevet de pilote de ligne est différente selon le type de recrutement du candidat : le premier recrutement est ouvert aux jeunes gens dotés d'une instruction générale du niveau des classes mathématiques supérieures, mais sans connaissance aéronautiques préalables (formation A et A'), le second est ouvert aux titulaires d'un brevet de pilote privé, professionnel ou militaire et possédant une expérience aéronautique confirmée ou à parfaire (formations F et B).

La formation A est dispensée à des promotions annuelles d'une soixantaine d'élèves, sélectionnés parmi des candidats de 18 à 21 ans, titulaires du baccalauréat, physiquement aptes, après des épreuves écrites et orales et un stage de sélection en vol. La formation comporte une phase d'enseignement théorique de 14 mois à l'École nationale de l'Aviation civile (E.N.A.C.), puis deux années d'instruction pratique dans les centres d'État de Montpellier puis de Saint-Yan, au cours desquelles les élèves effectuent 350 heures de vol et 150 heures de simulateur (fig. XV-6). Ils suivent enfin une phase de qualification et d'adaptation sur avion de ligne dans les centres d'instruction des compagnies aériennes avant de subir les épreuves du brevet de pilote de ligne.

La formation A' s'adresse à de jeunes ingénieurs qui suivent la même instruction que les élèves de la formation A, à l'exception de l'enseignement théorique à l'E.N.A.C.

La formation F est offerte par la compagnie Air France à de jeunes pilotes issus des aéroclubs, totalisant plus de 200 heures de vol, et titulaires des épreuves théoriques du brevet de pilote professionnel de 1re classe. Après une instruction de 17 mois, la qualification et l'adaptation sur avion de ligne, les élèves pilotes sont mis en ligne comme pilote professionnel de 1re classe et peuvent par la suite accéder à la carrière de pilote de ligne.

La formation B, s'adresse à des personnels déjà titulaires d'un brevet de pilotage (en général militaire) totalisant au moins 700 heures de vol.

2.2.2. Le personnel navigant commercial ou personnel complémentaire de bord. — Ce personnel est soumis aux mêmes règles de limitation de la durée d'emploi que le personnel de conduite. Le nombre de personnes qui le compose est évidemment fonction des tâches qui lui sont confiées suivant les parcours, puisque certains de ceux-ci ne comportent pas de services de repas ou de ventes à bord. Il y a toutefois un minimum imposé à ce nombre par la réglementation, par mesure de sécurité : un navigant commercial détenteur du certificat de sécurité et sauvetage s'il y a au moins 20 passagers à bord, deux navigants détenteurs dudit certificat s'il y a au moins 50 passagers, trois s'il y a plus de 100 passagers. Sur les longs parcours avec service à bord important, le per-

sonnel navigant commercial est composé de six à sept membres sur les Boeing 707 ou DC 8, de quinze personnes sur les Boeing 747.

Le personnel navigant commercial : chef de cabine, stewarts et hôtesses est généralement formé par les compagnies qui disposent d'écoles à cet effet, dotées de maquettes, en vraie grandeur, des cabines des appareils composant leur flotte.

2.3. Le déroulement du vol. — Une fois le décollage autorisé par la tour de contrôle de l'aéroport, l'appareil est pris en charge par les services de navigation aérienne, qui sont informés des intentions de vol du commandant de bord par le dépôt du plan de vol (V. chap. 14). Au-dessus des territoires habités les diverses routes aériennes sont jalonnées par des installations radioélectriques, sur lesquelles se guide l'équipage, en se maintenant au niveau de vol figurant au plan de vol (entre 8 000 et 12 000 mètres pour les appareils à réaction subsoniques, au-dessus de 15 000 mètres pour les supersoniques). Au-dessus des océans ou des régions désertiques, le navigateur contrôle sa route à l'aide de moyens de navigation classiques (y compris le point astronomique) ou l'équipage se fie aux indications du système de navigation à inertie (système doublé et même parfois triplé par mesure de sécurité). Dans le système de navigation à inertie (fig. XV-7) la détermination de la position s'effectue en intégrant deux fois l'accélération, ce qui détermine d'abord la vitesse de l'avion, puis la distance parcourue depuis le point de départ. Une centrale à inertie se compose d'accéléromètres, d'un repère d'orientation pour définir la direction des accélérations (l'un et l'autre basé sur l'emploi des gyroscopes), et d'un « calculateur » effectuant le calcul de la position par double intégration des accélérations.

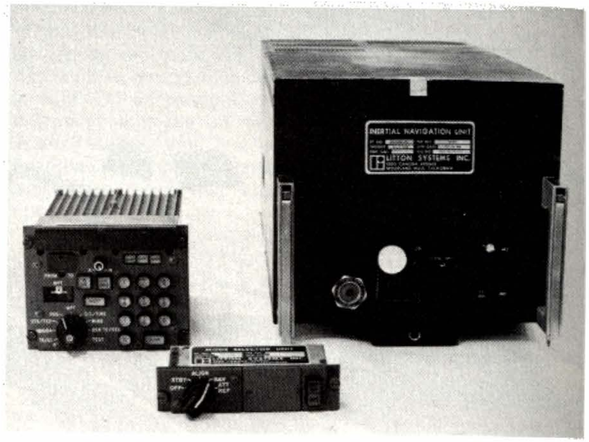


Fig. XV-7 — Système de navigation à inertie du Boeing 707 (*Air France*)

2.4. Les services au sol

2.4.1. Les services commerciaux. — Ils assurent la vente des billets, la réservation des places et le traitement des passagers ou commissariat.

a) La vente peut être réalisée par les compagnies dans leurs propres agences mais, dans la majorité des cas, elle est le fait d'agences ou bureaux de voyages indépendants rémunérés par des commissions à la charge du transporteur. Le billet d'avion n'est pas un simple ticket mais a une fonction de comptabilisation et d'échange qui lui permet d'être honoré par toute compagnie membre de



Fig. XV-8 — Salle de contrôle de la réservation (*Air France*)

l'I.A.T.A., autre que la compagnie émettrice. Le client des compagnies I.A.T.A. peut donc, en règle générale, changer de transporteur sans difficultés, si des questions d'horaire ou de place non disponible lui en imposent la nécessité.

b) La réservation est confiée à un service centralisé auquel s'adressent les bureaux émetteurs. Les compagnies importantes ont recours à l'emploi de système de réservation électronique (fig. XV-8) faisant appel à des ordinateurs de grande capacité à l'échelon central, travaillant en temps réel, qui sont reliés par liaisons spécialisées à des postes périphériques, parfois plusieurs milliers, situés dans les principales escales dans le monde. Les systèmes récents sont dits alphanumériques, c'est-à-dire qu'outre la gestion numérique des stocks de places offertes, ils enregistrent les noms des passagers, ce qui permet un meilleur ajustement de l'offre et de la demande, en particulier par une remise en vente rapide des places pour lesquelles un passager annule la réservation au tout dernier moment. La réservation électronique permet également de fournir aux clients éventuels toutes indications sur les vols offerts, les formalités à l'arrivée, les chambres d'hôtel disponibles à l'escale de destination.

c) Le traitement des passagers comprend l'enregistrement, le service de commissariat (préparation des prestations offertes en vol aux passagers), l'hébergement en cas de retard, le transport à terre en cas de déroulement des vols. L'enregistrement tend de plus en plus à se simplifier, puisqu'on supprime de plus en plus la pesée des bagages. Sur certains vols intérieurs américains on élimine même toute procédure d'enregistrement et même de réservation en procédant à la vente des billets à bord des appareils.

Les services de commissariat ont été réduits pour les vols à moyenne distance, mais ils subsistent et sont même renforcés pour les vols à longue distance. Le souci de ne pas introduire une concurrence anarchique entre compagnies a conduit l'I.A.T.A. à fixer très exactement la valeur des cadeaux distribués aux passagers, la quantité et la qualité des mets à servir à bord (fig. XV-9), le nombre de tranches de sandwichs et leur garniture, et à ne délivrer des distractions à bord, telles que le cinéma, que contre une participation aux frais. Dans d'aussi étroites limites, les compagnies s'emploient à personnaliser leurs services, afin d'affirmer leur image de marque. C'est ainsi qu'Air France gère elle-même ses services de préparation de repas à Orly comme à New York. Plusieurs milliers de repas sont ainsi préparés et emportés chaque jour dans les *galleys* des appareils. Ces meubles, qui assurent la conservation et le réchauffage des plats, représentent avec leur chargement et la vaisselle plusieurs centaines de kilos et prennent la place de plusieurs sièges. C'est dire l'importance que les compagnies attachent à cet aspect du traitement des passagers.

2.4.2. Les services techniques. — Leurs fonctions principales sont d'assurer le traitement des avions en escale (ou opérations de touchée) et l'entretien périodique des appareils.

1° *Opérations de touchée.* — La touchée peut être définie comme l'ensemble des opérations réalisées par le personnel au sol des compagnies à chaque passage d'un appareil dans une escale : elle comprend les opérations à l'arrivée et au départ, ainsi que celles entraînées par le séjour au sol de l'appareil et de son chargement.

Les agents de vol sont chargés des opérations relatives à la préparation des vols : ils apportent leur aide au personnel navigant pour l'établissement des plans de vols, établissent les feuilles de chargement, le calcul de centrage de l'appareil (la répartition des passagers dans la cabine, celle du fret dans les diverses soutes, et du carburant dans les réservoirs, doit être faite de telle sorte que l'équilibre de



Fig. XV-9 — Vue partielle des services de commissariat (*Air France*)



Fig. XV-10 — Installation d'embarquement du fret : palettes et convoyeur à rouleaux (*Air France*)



Fig. XV-11 — Transport spécial de marsouins vivants dans des hamacs (*J. Veuve — U.T.A.*)



Fig. XV-12

Transport d'une écurie de course (*U.T.A.*)

l'appareil en vol ne pose aucun problème). Ils suivent également le déroulement des vols; c'est ce que l'on appelle la veille-avion, qui permet de prendre en temps utile toutes mesures destinées à remédier aux incidents de vol : retard, déroutement, etc.

Le traitement de l'appareil comprend le guidage au sol, la mise en place des cales, des escaliers d'accès, des installations de sécurité et des groupes générateurs, le plein des réservoirs et le nettoyage intérieur de l'avion, l'équipement en matériel et vivres du commissariat et la visite de sécurité, dite de « prévol ».

Les opérations de ravitaillement en carburant ont été grandement facilitées par la mise en œuvre de l'*Hydrant system*, constitué par un ensemble de canalisations noyées dans le béton des pistes de stationnement des appareils, et de bouches de prise de carburant. Ce système permet de ravitailler rapidement des appareils tels que le Boeing 707 qui peut emporter 90 m³ de carburant ou le Boeing 747 dont la capacité maximale des réservoirs est de 193 m³.

Le traitement du fret (fig. XV-10, XV-11 et XV-12) exige beaucoup de rapidité, afin d'immobiliser au minimum les appareils au sol, et beaucoup de soins, car il s'agit de marchandises généralement coûteuses, fragiles, et non emballées. À cet effet, les services de fret réalisent des unités de chargement, spécifiques du transport aérien, qui sont la palette avion ou le conteneur léger. La palette avion est une plate-forme normalisée de 2,24 m sur 2,74 m ou de 2,24 m sur 3,18 m, dont la charge totale pour une hauteur de 2 mètres peut atteindre 3,5 tonnes, la tare représentant 3 à 5 % du chargement. La palette est calibrée grâce à des gabarits, pour s'adapter à la section polygonale des cabines des avions cargos. L'arrimage des colis est fait à l'aide de filets ou de structures légères, rigides, baptisées « igloos ». Les palettes sont transférées à bord des appareils à l'aide d'engins à rouleaux et d'élévateurs à ciseaux (V. fig. XV-10). Dans les appareils récents de transports de passagers, le fret voyageant en soutes est logé dans des conteneurs spéciaux épousant la forme de l'appareil pour gagner le plus de volume possible. Ces conteneurs sont en alliage léger de telle sorte que la tare soit très réduite (15 % de la charge totale), malgré la faible densité du fret. Dans les « aérogares de fret » modernes, les colis sont triés électroniquement, transportés par chariots à guidage automatique, classés dans des conteneurs et gerbés dans de gigantesques silos toujours sans intervention humaine.

2° *Entretien périodique des appareils* (fig. XV-13 et XV-14). — Jusqu'en 1964-1965 les méthodes d'entretien étaient basées *sur la prévention des pannes* comme au tout début de l'aviation. On fixait à l'avance, selon l'expérience acquise sur les divers matériels, un potentiel pour les principaux constituants de l'avion, c'est-à-dire un nombre d'heures à ne pas dépasser sans révision systématique. Ce potentiel atteint, on déposait le sous-ensemble intéressé, qui était mis au rebut ou soumis à révision après démontage intégral. C'est ainsi que les moteurs à pistons étaient déposés après 1 000 à 1 500 heures de fonctionnement de même que les équipements hydrauliques ou électriques, les cellules déshabillées et les pièces

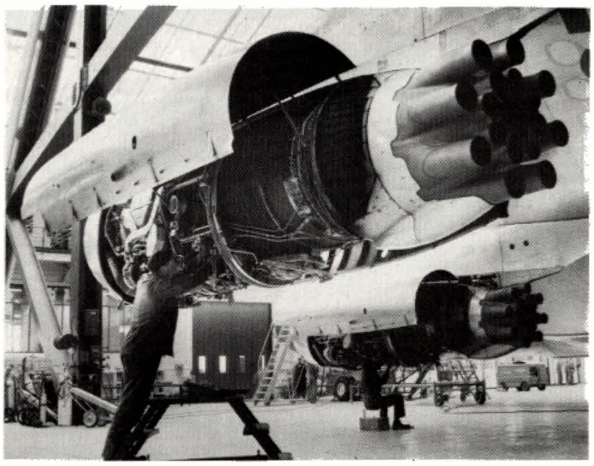


Fig. XV-13

Entretien des réacteurs (*Air France*)

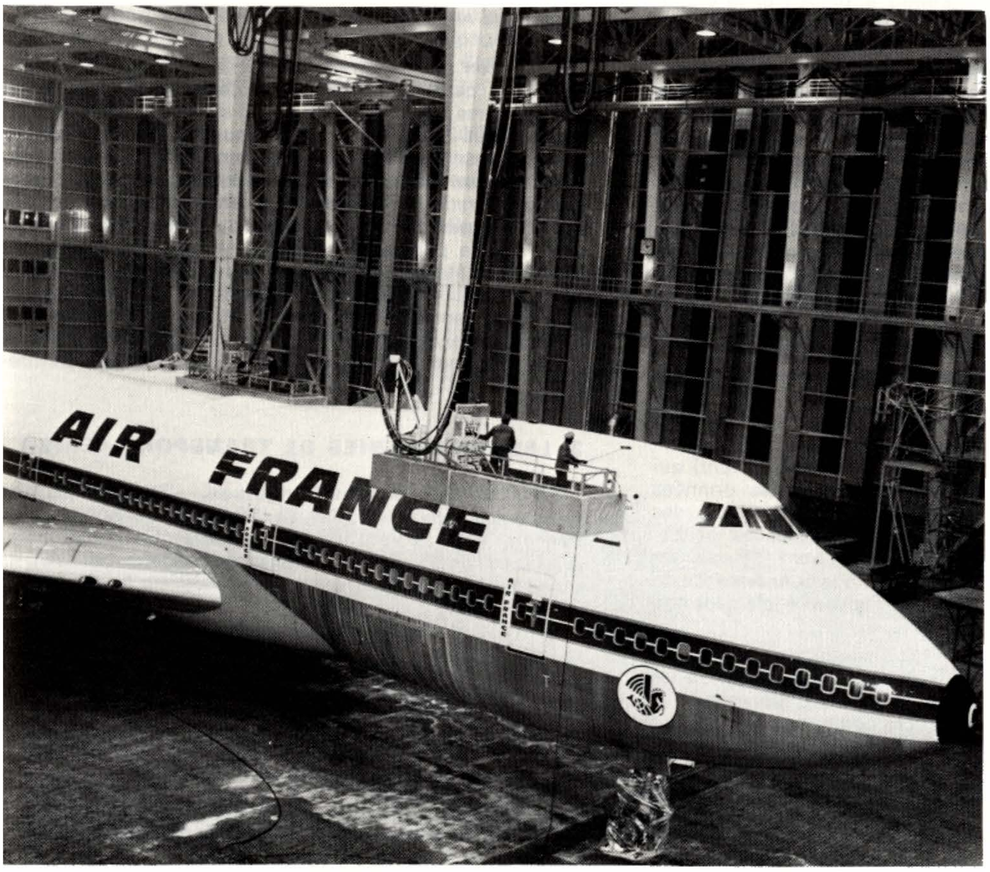


Fig. XV-14

Lavage d'un appareil à l'aide d'une nacelle suspendue (*Air France*)



Fig. XV-15 — Appareils récent et ancien de la compagnie Air France (*Air France*)

essentielles changées tous les 3 000 à 4 000 heures. Depuis 1965 un changement important de méthodes s'est produit aux États-Unis d'Amérique et a progressivement gagné toutes les compagnies mondiales : on applique à l'heure actuelle une politique d'entretien *selon l'état* qui s'appuye sur des programmes de contrôle des éléments constitutifs de l'avion ; on abandonne la notion de potentiel au profit de l'estimation de la probabilité de défaillance. L'introduction de ces nouvelles méthodes a été facilitée par la mise en œuvre de moyens de contrôle sans démontage et par un recours de plus en plus important aux ordinateurs au sol.

Parmi les moyens de contrôle sans démontage on citera :

— les bancs de test mobiles qui sont branchés en escale sur les circuits de l'avion ;

— les équipements de tests incorporés à l'avion ou BITE (*built in test equipment*) ;

— le système AIDS (*aircraft integrated data system*) qui enregistre à bord les paramètres moteurs, les données internes aux circuits et aux équipements, ainsi que des indications sur la conduite, la surveillance et les performances de l'avion. Le calculateur de bord détecte les anomalies et les porte immédiatement à la connaissance de l'équipage. Les données recueillies peuvent également être dépouillées au sol.

Les ordinateurs au sol suivent statistiquement le comportement des matériels, établissent les corrélations entre les taux de panne et l'état ou l'ancienneté des pièces ou des éléments constitutifs de l'avion. Les compagnies contrôlent ainsi la fiabilité (ou probabilité de défaillance) des éléments, ce qui permet de déterminer des cotes d'alerte qui déclencheront les mesures de dépose et de révision.

Bien que l'on ne se réfère plus à la notion de potentiel avec les nouvelles méthodes, on classe encore cependant les opérations d'entretien en trois catégories : passage de l'appareil en station-service toutes les 275 heures ; opérations de petit entretien, sans démontage, toutes les 1 000 heures ; opérations de grand entretien, avec démontage, toutes les 9 ou 10 000 heures pour les cellules, et toutes les 12 000 heures pour les réacteurs, avec vérification intermédiaire à 6 000 heures pour les parties chaudes. Pratiquement, les temps entre deux interventions ont doublé par rapport à la méthode précédente des potentiels. Cela a permis de diminuer le coût des opérations d'entretien, malgré le prix élevé des installations à terre et des systèmes embarqués. Il n'empêche que les dépenses d'entretien représentent encore 11 % environ des dépenses totales d'une compagnie et que 20 à 25 % de l'effectif global des compagnies est affecté aux opérations d'entretien.

3. LES COMPAGNIES DE TRANSPORT AÉRIEN

3.1. Les compagnies françaises. — Trois compagnies principales effectuent plus de 99 % du transport aérien français : deux à vocation essentiellement internationale : Air France et l'Union des transports aériens (U.T.A.), la troisième à vocation strictement intérieure à la métropole : Air Inter.

En utilisant comme unité la tonne-kilomètre transportée, qui regroupe le trafic des passagers (affectés d'une masse forfaitaire de 90 kg, bagages compris), de la poste et du fret, on constate qu'Air France a réalisé en 1971 75,9 % du trafic total français, évalué à 1 857 millions de tonnes-kilomètres transportées, l'U.T.A. 17,7 % et Air Inter 6,4 %. Toutefois, si l'on se réfère au seul trafic kilométrique des passagers, la part d'Air Inter est voisine de 10 % du total français.

Sur le plan mondial, la production française a représenté en 1971 3,1 % du trafic régulier, estimé à 60,6 milliards de

tonnes-kilomètres. Malgré cette part relativement faible la France se situe au 4e rang des puissances aéronautiques après les États-Unis d'Amérique (44,8 % du trafic mondial) l'U.R.S.S. (17,0 %), la Grande-Bretagne (4,1 %) et sur le même plan que le Japon et le Canada. Dans le classement inter-compagnies, les compagnies françaises se placent respectivement au 9e rang (Air France), au 31e (U.T.A.) et au 49e (Air Inter). Toutefois si l'on ne considère que le trafic international, Air France atteint le 5e rang (derrière l'Aéroflot, la Pan American Airways, la BOAC et la TWA).

Les entreprises françaises desservent 90 pays et leurs réseaux s'étendent sur les cinq continents. Air France et l'U.T.A. réalisent conjointement une ligne « tour du monde » : l'U.T.A. de Paris à Los Angeles via le Pacifique, Air France de Los Angeles à Paris via l'Atlantique. Air France est le 4e transporteur sur l'Atlantique Nord, le 3e sur l'Atlantique Sud. L'U.T.A. est le second transporteur sur l'axe Europe-Afrique.

3.1.1. Air France. — La marque « Air France » a fait son apparition en 1933 par suite de la fusion de cinq entreprises de transport aérien, dont la célèbre « Aéropostale », mais son statut actuel de société nationale résulte de la loi du 16 juin 1948.

La compagnie exploite un réseau de 420 000 kilomètres et a transporté en 1971 près de 6,5 millions de passagers. Ce trafic se répartit sur 72 pays et 140 escales et couvre l'ensemble du monde à l'exception de l'Australie et du Pacifique central.

Le réseau long-courrier (lignes vers l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud, l'Afrique, l'Asie) représente plus de 70 % de l'activité totale de la compagnie, et sur ce réseau le parcours moyen du passager est de l'ordre de 4 800 kilomètres.

Le réseau moyen-courrier regroupe outre les lignes d'Europe, celles reliant la France à l'Afrique du Nord et aux pays du Moyen-Orient, ainsi que les lignes métropolitaines (Paris-Nice et les lignes de Corse). Le parcours moyen du passager sur ce réseau n'est plus que de 770 kilomètres, mais le nombre de passagers transportés en 1971 est très proche de 5 millions.

Le transport de fret représente un peu plus du quart du tonnage kilométrique transporté par la compagnie : 57 % de ce fret a été transporté dans les soutes des appareils transports de passagers, les avions cargos ont acheminé le reste (43 %).

L'effectif de la compagnie est passé de 6 000 personnes en 1946 à 28 400 personnes en 1971 dont 4 200 font partie du personnel navigant. L'effectif des ateliers d'entretien est voisin de 7 000 personnes.

La flotte d'Air France se composait début 1972 de 95 avions, tous à réaction, dont 5 Boeing 747 gros porteurs de 350 places (fig. XV-15 et XV-16). Sur le réseau long-courrier, ils sont complétés par une flotte de 33 Boeing 707 (dont 3 avions-cargos). Le réseau moyen-courrier est exploité à l'aide de 40 Caravelle et de 17 Boeing tri-réacteurs 727.200 ; sur certaines lignes sont également mis en œuvre quelques exemplaires de la flotte de Boeing 707. Par ailleurs, Air France assure l'exploitation de 15 Fokker F 27 à turbopropulseurs et de 4 Douglas DC 4, pour le compte du ministère des Postes et Télécommunications (aviation postale).

Cette flotte sera renforcée d'ici 1975 par des Boeing 747 et 727 supplémentaires et surtout par les appareils Airbus B 300, dont la compagnie a commandé ferme 6 exemplaires (plus 10 options) et les Concorde (6 options).

La base principale d'Air France est située sur le terrain d'Orly, où sont installés les ateliers d'entretien, l'aérogare de fret, le commissariat. Elle dispose notamment à Orly d'un hangar géant à double cellule pour l'entretien des Boeing 747 qui lui sont propres ou appartiennent aux compagnies membres du groupe ATLAS (V. § 3.3).

La nouvelle aérogare de fret d'Orly, entièrement automatisée et d'une capacité de 250 000 tonnes par an, est la propriété d'Air France, qui dispose également à titre privatif d'une aérogare automatisée à Londres-Heathrow et de locaux de traitement des passagers à New York-Kennedy. En ce qui concerne l'entretien des appareils, Air France dispose à Toulouse des installations et du terrain de Montaudran.

Parmi les équipements au sol, qu'il convient de mentionner, on citera également le système de réservation alphanumérique qui relie entre elles les principales escales de la compagnie en Europe et en Amérique du Nord (V. t. 2, Informatique, chap. 5).

3.1.2. L'Union des Transports Aériens (U.T.A.). — L'U.T.A., compagnie privée de transports aériens, a été constituée en 1963 par fusion de deux compagnies également privées, l'Union Aéromaritime de Transports (U.A.T.) qui exploitait des lignes en Afrique Noire et les Transports Aériens Intercontinentaux (T.A.I.) qui desservait l'Indochine et le Pacifique Central.

Dès la constitution de l'U.T.A., et compte tenu de la création de compagnies aériennes nationales ou multinationales en Afrique, une redistribution des lignes a été faite par décision ministérielle entre Air France et l'U.T.A. principalement en Afrique. L'U.T.A. dessert, d'une part, l'ensemble de l'Afrique à l'exception de l'Afrique du Nord, de Dakar et des lignes vers Madagascar et la Réunion via Djibouti, d'autre part les pays d'Asie du Sud-Est et d'Océanie (situés à l'Est du méridien de Calcutta et au Sud du parallèle de Saïgon) et au-delà Honolulu et Los Angeles.

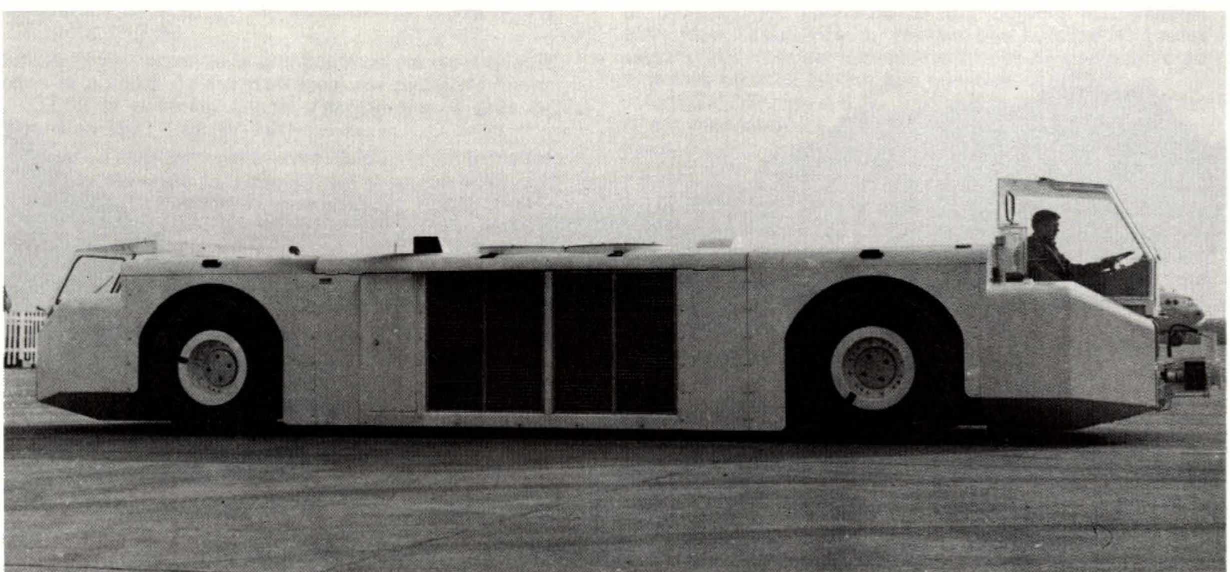


Fig. XV-16 — Tracteur de manœuvres utilisé pour les Boeing 747 (*Air France*)



Fig. XV-17

Douglas DC 8-62
(*J. Veuve — U.T.A.*)

Fig. XV-18

Transport de fret
« Super Guppy »
(*U.T.A.*)



L'U.T.A. emploie plus de 5 000 personnes dont environ 700 navigants. Sa flotte se composait, fin 1971, de 14 appareils : 11 Douglas type DC 8 dont 2 cargos, 2 Caravelle et 1 DC 4. Parmi les DC 8 affectés au transport des passagers, 4 sont des DC 8-62 (fig. XV-17), version allongée du DC 8 équipée de réacteurs double flux. Cette flotte sera renforcée par des DC 10 long-courriers triréacteurs à grande capacité (4 commandes fermes et 4 options) dont les trois premiers ont été livrés en 1973.

La compagnie exploite un réseau de 209 000 kilomètres et a transporté en 1971 près de 400 000 passagers, dont le parcours moyen a été voisin de 5 500 kilomètres. Le transport de fret représente près de 40 % du tonnage kilométrique total transporté par la compagnie (fig. XV-18).

La base principale de l'U.T.A. (ateliers d'entretien, aérogare de fret, services au sol) était installée sur l'aérodrome du Bourget ; elle a été transférée à Roissy en 1974. Parmi les autres installations au sol, il faut citer le centre de Papeete à Tahiti, relais des appareils long-courriers desservant le Pacifique (fig. XV-19), Honolulu et Los Angeles.

3.1.3. La compagnie Air Inter. — Compagnie privée, Air Inter a pris sa structure définitive en 1960, date que l'on peut considérer comme celle de la fondation d'un véritable transport aérien intérieur français.

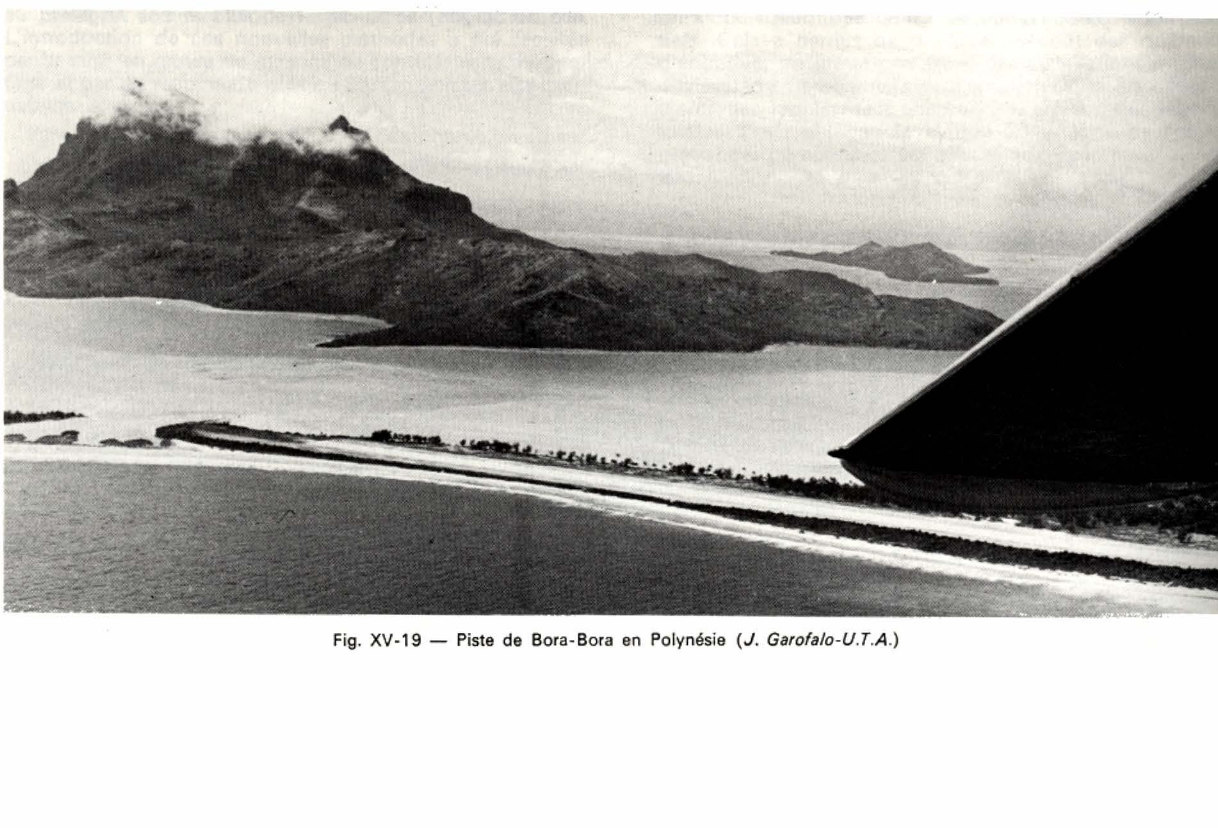


Fig. XV-19 — Piste de Bora-Bora en Polynésie (*J. Garofalo-U.T.A.*)



Fig. XV-20 — Embarquement à bord d'un avion Air Inter (*Air Inter*)

Le capital d'Air Inter est réparti entre des actionnaires publics (Air France 25 %, S.N.C.F. 25 %, Caisse des Dépôts et Consignations 4 %) et des actionnaires privés (dont l'U.T.A. pour 14,7 %).

Depuis 1960, l'essor de la compagnie a été remarquable puisque le nombre de ses passagers est passé de moins de 100 000 la première année d'exploitation à près de 3 millions en 1971 (fig. XV-20).

Air Inter a mis sur pied, avec l'aide de collectivités locales (Chambres de commerce) qui jusqu'en 1971 ont fourni un appui financier important, un réseau cohérent de près de 20 000 kilomètres. Il permet des liaisons aller et retour dans la journée entre Paris et les grandes villes de province et fait que les villes de province sont à moins de deux heures les unes des autres (V. carte, page suivante).

Air Inter emploie un peu moins de 3 500 personnes, dont près de 800 font partie du personnel navigant. Sa flotte se composait, fin 1971, de 42 appareils: 14 Caravelle, 14 turbopropulseurs Viscount de 60 places, 10 turbopropulseurs Fokker F-27 de 52 places, et 4 Nord 262 de 26 places. En 1972, commence la livraison de 6 Caravelle XII, version allongée des Caravelle précédentes, comportant 132 sièges; Air Inter a pris en outre dix options sur l'appareil Mercure (149 sièges).

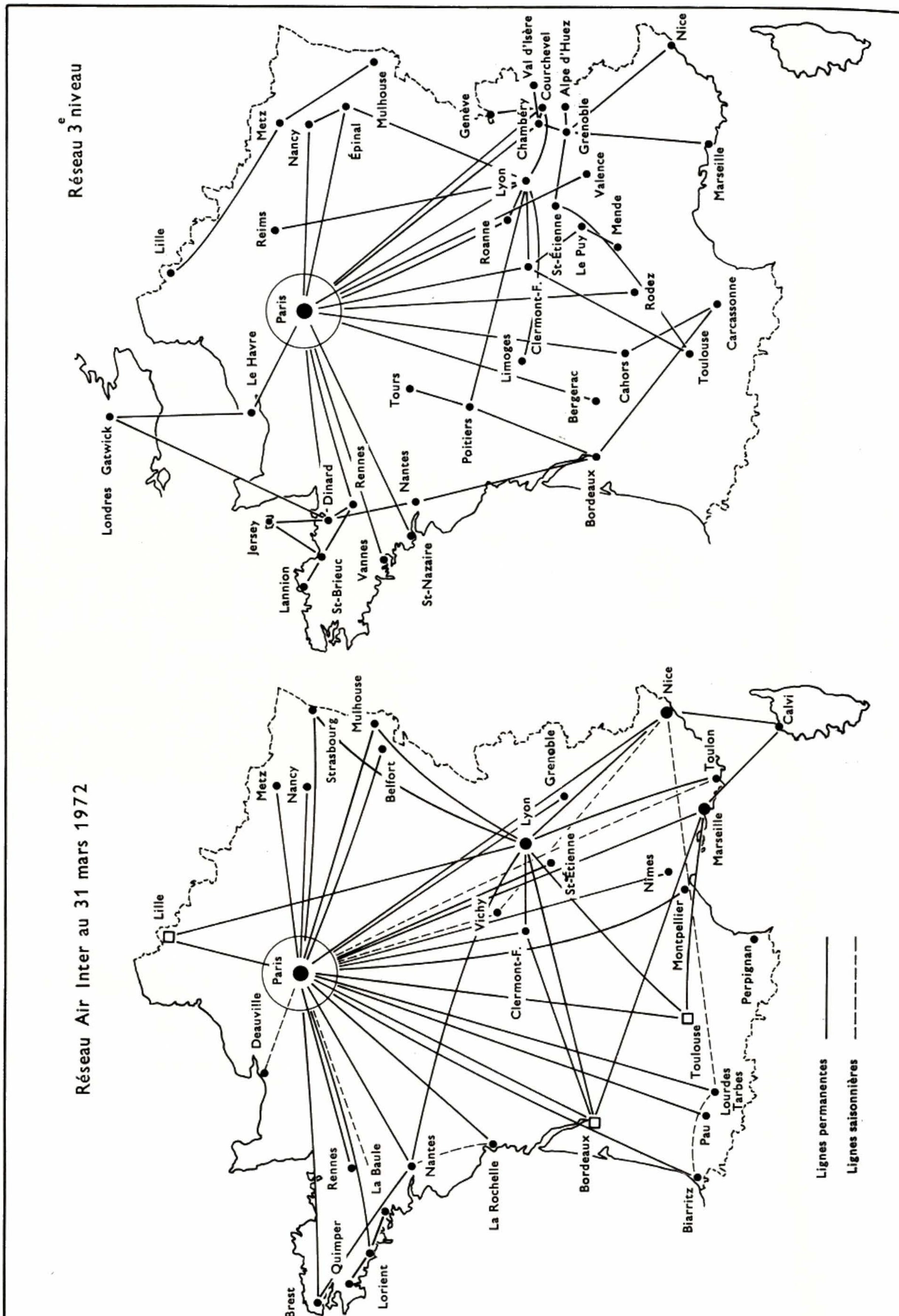
Toutes les Caravelle d'Air Inter sont équipées du système d'atterrissage automatique « Sud-Lear ». Ce système, plus connu sous la dénomination A.T.T. (atterrissage tous temps) permet de se poser dans des conditions de visibilité à peu près nulles, sur tout aérodrome équipé d'émetteurs et de balisages spéciaux, ce qui confère aux usagers d'Air Inter l'assurance du respect des horaires en toutes saisons. Air Inter est actuellement la seule compagnie au monde à offrir ce service à la clientèle.

La base principale d'Air Inter est à Orly, où elle utilise la nouvelle aérogare d'Orly-Ouest. Air Inter dessert également, à partir de Roissy, les principales villes françaises, depuis 1974.

3.1.4. Les compagnies de « 3e niveau ». — Par analogie avec les subdivisions des compagnies américaines (V. § 3.2) on baptise en France compagnie de « 3e niveau » les compagnies autres qu'Air France et l'U.T.A. (qui constitueraient ainsi un premier niveau) et qu'Air Inter qui correspond, à elle seule, au 2e niveau.

Au 31 décembre 1971, la France comptait 13 compagnies de 3e niveau, regroupées au sein de l'A.T.A.R. (Association des Transports Aériens Régionaux) : Air Alpes, Air Centre, Air Champagne-Ardennes, Air Limousin, Air Paris, Air Périgord, Air Vosges, Avia Taxi Corsair, Europe Aéro-Service, Rousseau Aviation, Touraine Air Transport et Uni-Air.

Ces compagnies sont complémentaires des trois grandes compagnies françaises en ce sens qu'elles exploitent généralement des lignes à faible trafic que ne peuvent exploiter les autres compagnies. Les lignes exploitées sont généralement des lignes directes, la moitié environ joint des villes


Réseau Air Inter au 31 mars 1972
Lille
Metz
Nancy
Strasbourg
Mulhouse
Belfort
Deauville
Paris
Lyon
Grenoble
Nice
Calvi
Toulon
Marseille
St-Étienne
Nîmes
Vichy
Clermont-F.
Montpellier
Perpignan
Toulouse
Lourdes
Tarbes
Pau
Biarritz
Bordeaux
La Rochelle
Nantes
La Baule
Rennes
Quimper
Lorient
Brest
Lignes permanentes
Lignes saisonnières
Réseau 3e niveau
Lille
Metz
Nancy
Épinal
Mulhouse
Reims
Paris
Le Havre
Londres Gatwick
Jersey
Dinard
Rennes
Lannion
St-Brieuc
Vannes
Nantes
St-Nazaire
Tours
Poitiers
Bordeaux
Limoges
Bergerac
Cahors
Clermont-F.
Roanne
Lyon
Genève
Chambéry
Val d'Isère
Courchevel
Alpe d'Huez
Grenoble
Valence
St-Étienne
Le Puy
Mende
Rodez
Toulouse
Carcassonne
Marseille
Nice

de province de moyenne importance à Paris, l'autre joint entre elles des villes de province. Deux lignes au moins sont internationales et relient des villes de province à Londres (V. carte, page précédente).

Les appareils mis en œuvre par les compagnies du 3e niveau vont de l'appareil monomoteur de 4-5 places au turbopropulseur de 50-60 places, l'appareil le plus répandu dans les diverses flottes étant le Beechcraft 99 de 15 places.

L'essor du trafic complémentaire français est rapide. C'est ainsi que le nombre de passagers transportés (sur un parcours moyen évalué à 250 km) est passé de 186 000 en 1970 à 300 000 en 1971.

3.2. Les compagnies aériennes étrangères

3.2.1. Les compagnies américaines. — Pour situer l'importance des compagnies américaines, il suffit d'indiquer qu'elles ont réalisé en 1971 près de 45 % du trafic régulier mondial (U.R.S.S. comprise) exprimé en tonnes-kilomètres totales transportées. Le transport intérieur assuré par ces compagnies représente plus de trois fois le trafic international qu'elles réalisent.

On distingue trois grandes catégories de compagnies en matière de transport intérieur:

a) *Les compagnies principales ou « trunklines ».* — Au nombre de douze effectuant des vols à longue distance (en particulier des vols « côte à côte » de l'Atlantique au Pacifique), ces compagnies ne reçoivent pas de subvention de l'administration.

b) *Les compagnies locales.* — Actuellement au nombre de neuf, elles desservent un réseau couvrant au maximum une dizaine d'États. Ces compagnies sont subventionnées par l'Administration. En 1971, par exemple, les subventions ont atteint 59 millions de dollars soit 7,6 % du chiffre d'affaires de ces compagnies, évalué à 769 millions de dollars.

c) *Les « commuters » ou compagnies de 3e niveau.* — Elles assurent des vols de correspondance avec les compagnies susvisées, généralement sur de courtes distances (100 à 400 km) en utilisant des appareils de faible capacité. En 1971, ces compagnies, au nombre de 161 ont transporté plus de 4 millions de passagers, à l'aide de 690 appareils.

En matière de trafic international régulier, c'est l'Administration américaine qui désigne les compagnies chargées d'exploiter tel ou tel grand secteur: Atlantique, Pacifique, Amérique du Sud, etc. Les compagnies qui effectuent du trafic régulier international sont en fait les compagnies principales ou « *trunklines* », dont le trafic international n'est qu'une faible part de leur activité totale, à deux exceptions près: la Trans World Airways (TWA) dont le trafic international atteint plus du tiers de la production totale, et la Pan American Airways (PAA) dont le trafic intérieur est infime comparé à son trafic international. Ces deux dernières compagnies sont désignées conjointement sur l'Atlantique et desservent en particulier l'Europe.

Le trafic international non régulier est principalement le fait des compagnies « supplemental carriers » déjà évoquées. Elles sont également désignées par l'Administration américaine pour chacun des grands secteurs mondiaux. Sur l'Atlantique on retrouve ainsi les compagnies World Airways, Capitol.

Les États-Unis d'Amérique disposent également de compagnies qui réalisent uniquement des transports de fret, soit sur des lignes régulières, soit à la demande: les trois principales étant les compagnies Airlift, Flying Tiger et Seabord.

La plus grande compagnie américaine est une compagnie à vocation uniquement intérieure, l'United Air Lines, qui a transporté en 1971 25 millions de personnes et réalisé 4,6 milliards de tonnes-kilomètres (plus de trois fois le trafic d'Air France).

La TWA et la PAA ont, la même année, réalisé chacune environ 4 milliards de tonnes-kilomètres avec des flottes comportant notamment des Boeing 747 gros porteurs en nombre important (14 pour la TWA et 24 pour la PAA).

Les compagnies locales sont sensiblement de l'importance de la compagnie Air Inter. Si la première d'entre elles, la compagnie Allegheny a transporté en 1971 6 500 000 passagers, la deuxième en importance, la North Central en a transporté 3 800 000.

3.2.2. L'Aéroflot. — L'Aéroflot est l'unique transporteur aérien civil de l'U.R.S.S., et, du fait de ce monopole, est la première compagnie aérienne mondiale.

Elle exploite un réseau de 650 000 kilomètres, dont plus de 150 000 kilomètres de lignes internationales. Son activité ne se limite pas au seul transport aérien, puisqu'elle est également chargée du travail aérien (notamment en matière de travaux pour l'agriculture), de la lutte contre les incendies de forêts, des recherches géologiques et géodésiques. Cela explique qu'elle emploie 400 000 personnes et qu'elle dispose d'environ 1 600 appareils de tous types, y compris des hélicoptères.

En 1971 l'Aéroflot a transporté 82 millions de passagers (reste de l'O.A.C.I. = 325 millions) et réalisé 10,3 milliards de tonnes-kilomètres totales (reste de l'O.A.C.I. = 50 milliards).

Son trafic international est encore peu développé puisqu'il représente au plus 1 % des passagers-kilomètres produits dans le monde, mais, en revanche, son trafic intérieur est très important puisqu'il atteint la moitié du trafic intérieur américain.

3.2.3. Les compagnies européennes. — Pratiquement chaque État possède une seule compagnie de transport régulier international, les seules exceptions notables étant la Grande-Bretagne qui compte trois compagnies susceptibles d'exercer les droits de trafic du pays, la France où existent deux compagnies exerçant ces droits, et les pays scandinaves: Danemark, Norvège et Suède qui ont une compagnie multinationale, le SAS (*Scandinavian Airlines System*).

Par ordre d'importance on trouve:

— la BOAC (British Overseas Airways Corporation) qui exploite les lignes internationales au départ de la Grande-Bretagne, à l'exception des lignes vers l'Europe et le Proche-Orient, et a produit 1,73 milliard de tonnes-kilomètres totales (TKT) en 1970. Elle comptait alors 24 000 agents et elle disposait de 53 appareils quadriréacteurs long-courriers.

— Air France (1,42 milliard de TKT).

— La Lufthansa, compagnie de l'Allemagne de l'Ouest: 1,28 milliard de TKT, 22 000 agents et 75 appareils dont 23 long-courriers et 52 moyen-courriers.

— Alitalia, compagnie italienne: 992 millions de TKT, 14 000 agents et 86 appareils dont 24 long-courriers.

— La KLM, compagnie hollandaise: 923 millions de TKT, 16 000 agents et 47 appareils dont 27 long-courriers.

— Le SAS: 722 millions de TKT, 14 000 agents et 69 appareils dont 14 long-courriers.

— Quatre autres compagnies ont réalisé également un trafic important compris entre 400 et 600 millions de TKT: l'Iberia, compagnie espagnole; la Swissair, compagnie suisse; la Sabena, compagnie belge; la BEA (*British European Airways*) qui exploite des lignes intérieures britanniques et les lignes internationales entre la Grande-Bretagne, l'Europe et le Proche-Orient.

3.3. Les accords inter-compagnies.

3.3. Les accords inter-compagnies. — Pour éviter une concurrence anarchique les compagnies aériennes régulières ont depuis longtemps décidé de fixer en commun leurs tarifs. Mais les accords inter-compagnies ont été plus loin dans plusieurs domaines:

a) *Les compagnies multinationales.* — Si le projet de compagnie unique européenne Air Union, lancé en 1960 par Air France, Lufthansa, Alitalia, Sabena et KLM a échoué, d'autres associations entre compagnies ou entre États ont pu aboutir:

— le SAS compagnie unique des trois pays nordiques: Danemark, Suède, Norvège, créée en 1960;

— Air Afrique, fondée en 1963 par dix États africains francophones;

— East African Airways, qui exploite pour le compte d'États africains anglophones: le Kenya, la Tanzanie et l'Ouganda.

b) *Les accords commerciaux.* — Ce sont les plus fréquents: chaque compagnie garde son autonomie, mais certaines activités commerciales sont mises en commun sous forme de *pools*. Les pools portent soit sur les recettes,

soit sur l'ensemble de l'activité, recettes et dépenses, d'une ou plusieurs lignes. Ces accords évitent les aspects négatifs de la concurrence.

Les accords d'affrètement sont fréquents : une compagnie sous-équipée peut avoir recours, pour un temps déterminé, aux appareils dont une autre compagnie n'a pas temporairement l'emploi. La location peut être complète (appareils et équipage) ou porter seulement sur l'appareil : elle est dite alors « coque nue ».

Sur certains tronçons de ligne peuvent également s'établir des affrètements partiels : une compagnie importante met à la disposition d'une compagnie locale une partie de la capacité totale de ses appareils.

c) *Les accords techniques.* — Ils peuvent revêtir des formes très diverses :

— *Accords d'assistance au sol.* — Les compagnies aériennes, même très puissantes, ne peuvent entretenir leurs propres services d'escales dans tous les points qu'elles desservent. Elles font réaliser leurs opérations de touchées sur une escale donnée, soit par les services d'aéroport, soit par la compagnie nationale du lieu considéré.

— *Mise en commun des pièces de rechanges.* — Pour éviter la multiplication de stocks onéreux de pièces de rechange, notamment de moteurs et de réacteurs, les compagnies se groupent par ensembles disposant d'un même type d'appareil pour créer des dépôts à usage commun.

— *Entretien réalisé en commun.* — Devant le coût de plus en plus élevé des installations et équipement d'entretien (une cellule d'entretien du Boeing 747 peut coûter 40 millions de francs) des compagnies, essentiellement en Europe, exploitant un même type d'appareils, se sont groupées pour répartir entre elles les tâches d'entretien. De tels accords évitent les doubles emplois en matière d'équipements, diminuent l'importance du stock de rechanges, permettent de mieux égaliser la répartition de l'entretien sur l'ensemble de l'année. L'économie ainsi réalisée peut atteindre 15 à 20 %.

L'achat des simulateurs de vol peut être également réalisé en coopération et les compagnies membres des accords d'entretien s'orientent vers un achat en commun des appareils, permettant une normalisation des types et l'octroi de meilleures conditions d'achat.

À l'initiative d'Air France, un comité dit « Comité Montparnasse » a été constitué par les principales compagnies européennes, pour exploiter les possibilités et fixer les règles d'une coopération efficace en matière d'entretien. Il a permis la création de deux groupes d'entretien en commun ;

● *Le groupe Atlas* fondé en 1969 par Air France, la Lufthansa, Alitalia et la Sabena, pour assurer l'entretien en commun des Boeing 747. Il est prévu que l'accord réalisé s'étendra aux futurs appareils : Concorde, Airbus ou autres acquis par les compagnies intéressées. En ce qui concerne le Boeing 747, Air France entretient les cellules, la Lufthansa les moteurs, Alitalia et la Sabena les équipements. En outre la Lufthansa a la charge de l'achat des premiers simulateurs de vol pour l'entraînement des équipages. La compagnie Iberia vient récemment de s'intégrer au groupe Atlas.

● *Le groupe KSSU :* également fondé en 1969, rassemble la KLM, le SAS, la Swissair et l'U.T.A. Il a pour but l'achat en commun puis l'entretien des triréacteurs Douglas DC 10 livrés à partir de 1972. Mais, d'ores et déjà, il a permis la répartition entre ses membres des travaux d'entretien des DC 9 et des Boeing 747. Sa création a été facilitée par le fait que, depuis plus de 10 ans, le SAS et la Swissair pratiquaient un entretien en commun.

4. LES INSTANCES INTERNATIONALES

4.1. L'O.A.C.I. (Organisation de l'Aviation civile internationale). — La convention de Chicago de 1944, tout en préconisant l'adoption de normes communes en matière de transport et d'infrastructure aérienne, a créé un organisme chargé de veiller à l'application des principes ainsi définis et de compléter la convention elle-même par des annexes techniques : l'O.A.C.I. institution spécialisée rattachée à l'O.N.U., qui groupe actuellement 120 États, dont l'U.R.S.S. (depuis novembre 1970).

Elle a pour objet de développer les principes et les techniques de la navigation aérienne internationale, ainsi que de favoriser l'établissement et de stimuler le développement des transports aériens internationaux.

L'O.A.C.I. se compose d'une assemblée, d'un conseil, de commissions ou comités subsidiaires et d'un secrétariat.

L'assemblée des États est l'organe souverain. Chaque État membre y dispose d'une voix, les décisions étant prises à la majorité des suffrages exprimés. Elle désigne les États qui seront représentés au Conseil, prend les décisions nécessaires à la suite des rapports de ce dernier et décide des questions à lui soumettre.

Entre les sessions, elle délègue en permanence au Conseil et à ses organes subsidiaires la mise en œuvre d'une politique générale qu'elle définit ou qu'elle inspire.

Le Conseil est l'organe permanent. Il est actuellement composé de 27 membres. Les États d'importance moyenne en matière d'aviation civile sont représentés au Conseil, de même que ceux qui fournissent le plus d'installations et de services de navigation aérienne ; en outre les différentes régions du monde doivent avoir un représentant au conseil. La France a jusqu'ici toujours été représentée au conseil.

Les pouvoirs du conseil sont très étendus : études, recherches, enquêtes, arbitrages, mais sa principale fonction est l'adoption de « normes internationales » ou « pratiques recommandées » qui constituent les annexes techniques à la Convention de Chicago.

Ces règlements ne lient pas ipso facto les États souverains, qui doivent cependant notifier à l'O.A.C.I. les différences entre leurs pratiques nationales et la norme internationale. Mais le fait que ces règlements soient élaborés après de sérieuses études des spécialistes des États membres et consultations des gouvernements et soient approuvés par le Conseil, leur confère une valeur certaine, et les États répugnent à s'écarter par trop des normes ainsi établies.

Le Conseil est assisté de cinq organes annexes :

— la Commission de navigation aérienne qui étudie pour le compte du Conseil les mesures techniques qui peuvent aider aux progrès de la navigation aérienne ;

— le Comité du transport aérien, dont les attributions sont d'ordre économique ;

— le Comité juridique qui élabore les projets de conventions internationales soumis à l'approbation des Conférences internationales réunies à l'instigation de l'O.A.C.I. ;

— le Comité de l'aide collective pour les services de la navigation aérienne ;

— le Comité financier, chargé de l'étude des problèmes financiers de l'O.A.C.I.

Le secrétariat général est l'organe d'exécution, responsable de l'administration quotidienne, de l'organisation, ainsi que de la préparation de toutes les conférences. Il comprend 200 fonctionnaires internationaux recrutés parmi les États membres de l'O.A.C.I.

4.2. La Commission européenne de l'aviation civile (C.E.A.C.). — Première institution régionale consacrée à l'aviation civile, elle a été créée à l'initiative du Conseil de l'Europe.

La C.E.A.C. groupe actuellement 20 États européens : Autriche, Belgique, Danemark, France, République fédérale allemande, Chypre, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Norvège, Portugal, Espagne, Suède, Suisse, Turquie, Royaume-Uni et Finlande.

Elle se réunit en session plénière tous les trois ans et possède un bureau permanent qui joue le rôle de Comité de coordination vis-à-vis des quatre Comités permanents de la C.E.A.C. : Comité ECO 1 pour les transports réguliers, ECO 2 pour les transports non réguliers, comité technique et comité de facilitation.

Le but essentiel de la C.E.A.C. est la recherche d'un accord multilatéral pour les transports aériens réguliers en Europe. Le but n'est pas encore atteint, mais en matière de transport non régulier, de facilités ou de coordination entre les compagnies aériennes, la C.E.A.C. a obtenu des résultats très positifs.

4.3. L'Association du Transport aérien international (I.A.T.A.). — Contrairement aux organismes susmentionnés l'I.A.T.A. ne regroupe pas les États mais les compagnies aériennes elles-mêmes. C'est donc une organisation professionnelle privée.

L'I.A.T.A. s'est donnée pour buts :

a) d'encourager le développement des transports aériens sûrs, réguliers et économiques, de favoriser le commerce aérien et d'étudier les problèmes qui s'y rapportent ;

b) de fournir les moyens propres à une collaboration des entreprises de transports aériens internationaux ;

c) de coopérer avec l'O.A.C.I. et autres organismes internationaux.

Elle compte actuellement 91 compagnies membres plus 14 compagnies associées (compagnies intérieures) et fait fonction de porte-parole de l'industrie du transport aérien dans ses relations avec les gouvernements ou les organismes internationaux.

L'autorité suprême de l'I.A.T.A. est l'assemblée générale des membres actifs. La gestion courante est assurée par un comité exécutif élu qui dirige le travail de cinq comités : technique, financier, juridique, médical et comité consultatif du trafic.

Les conférences de trafic de l'I.A.T.A. réunissent les directeurs des compagnies par grandes zones : Amérique, Europe-Afrique, Asie-Pacifique, pour préparer les décisions en matière commerciale.

Tous les deux ans ces conférences se regroupent en session plénière pour arrêter la politique aérienne des compagnies en matière de règlements et de tarifs, pour les deux ans à venir. Les résolutions sont prises selon la règle de l'unanimité, chaque compagnie disposant ainsi d'un droit de veto. Elles sont ensuite soumises à l'homologation des différents gouvernements avant leur entrée en vigueur. La structure tarifaire mondiale ainsi constituée comporte actuellement plus de 1 500 résolutions, fixant les tarifs applicables sur 150 000 relations aériennes.

Mais la réalisation la plus importante de l'I.A.T.A. pour la commodité des transports aériens est la création d'une chambre de compensation, chargée d'effectuer le règlement du produit des ventes entre compagnies. Ce mécanisme financier, dont le chiffre de transactions annuel atteint plusieurs milliards de dollars, permet l'interchangeabilité des billets, le transfert des passagers d'une compagnie à l'autre et facilite énormément les voyages en correspondance.

4.4. L'Association des transporteurs aériens de la zone franc ou A.T.A.F. — Cette association qui fonctionne sur le même principe que l'I.A.T.A. regroupe treize transporteurs français ou appartenant à l'Afrique du Nord et aux pays francophones d'Afrique. Elle suit les questions tarifaires intéressant les liaisons entre la France, l'Afrique du Nord et l'Afrique francophone.

Les membres de l'A.T.A.F. sont, en général, également membres de l'I.A.T.A.

CHAPITRE XVI

L'AVIATION GÉNÉRALE

Le terme d'aviation générale est repris du terme anglo-saxon de « General Aviation » qui comprend toutes les activités aériennes autres que celles du transport aérien commercial. On utilise également en France l'appellation « aviation diverse » qui correspond mieux au domaine qu'elle recouvre, mais de fait, c'est l'emploi du terme aviation générale qui a prévalu.

Trois grandes catégories d'activités peuvent être distinguées dans l'aviation générale : l'aviation d'affaires, l'aviation légère, le travail aérien.

1. IMPORTANCE DE L'AVIATION GÉNÉRALE

Dans les États membres de l'O.A.C.I., on compte actuellement plus de deux millions de pilotes privés pour quelques 190 000 aéronefs d'aviation générale, de tous types.

Ce sont les États-Unis d'Amérique, qui disposent de la flotte la plus importante. Elle est évaluée à 150 000 appareils, soit près de 80 % du parc mondial, et comprend essentiellement des avions équipés de moteurs à pistons (dont 124 000 monomoteurs et 19 000 multimoteurs). Les appareils à turbomachines (turboréacteurs ou réacteurs) sont relativement peu nombreux : 3 400 environ, soit autant que les hélicoptères.

Le parc européen est beaucoup plus réduit mais comporte cependant près de 20 000 appareils. La France occupe le premier rang en Europe avec 5 400 aéronefs d'aviation générale, devant la République fédérale allemande (3 700), la Grande-Bretagne (2 900), l'Italie et la Suède (1 000 appareils chacune). En France, l'essor de l'aviation générale a été facilité par la vitalité de la construction aéronautique légère (œuvre de petites entreprises souvent artisanales), par l'étendue du territoire et par les conditions climatiques assez favorables à la pratique du sport aérien. À ces facteurs techniques il faut ajouter l'aide de l'État qui s'est exercée surtout en faveur des jeunes pilotes. La flotte française d'aéronefs d'aviation générale comprend une centaine d'hélicoptères (surtout utilisés pour le travail aérien) et 5 300 avions dont une trentaine d'appareils à réaction et une vingtaine d'appareils à turbopropulseurs. La quasi-totalité de la flotte est donc constituée d'appareils à moteurs à pistons, dont 300 bimoteurs, 400 monomoteurs comportant plus de 4 places et 4 530 appareils de moins de 200 ch (145 kW), comportant au plus 4 places. En 1971, l'ensemble de la flotte d'aviation générale a effectué 720 000 heures de vol (non compris le travail aérien), ce qui correspond à un peu plus de 130 heures de vol par appareil, ce qui est encore loin des 170 heures de vol effectuées, en moyenne par les appareils d'aviation générale aux États-Unis d'Amérique.

Il convient également de citer l'activité de vol à voile qui correspond en France à près de 200 000 heures de vol réalisées par une flotte de 1 100 planeurs (1 700 unités aux États-Unis d'Amérique).

2. L'AVIATION D'AFFAIRES

Cette catégorie s'est peu à peu dégagée du gros de l'aviation générale constituée par les appareils d'aviation légère. Initialement les possesseurs d'avions particuliers les utilisaient en partie pour le tourisme et en partie pour leurs déplacements d'affaires, mais il a fallu attendre que les appareils légers accroissent leur rayon d'action, leur vitesse, leur sécurité (emploi de multimoteurs) et surtout qu'ils acquièrent un équipement de bord leur permettant de voler par tous temps pour que l'aviation se révèle comme un moyen de transport spécialement bien adapté aux déplacements pour motifs professionnels. À côté des flottes d'avions-taxis effectuant des vols à la demande pour le compte d'industriels ou de commerçants, s'est développée une flotte appartenant soit à des particuliers, soit à des firmes industrielles ou commerciales, spécialement affectée aux vols d'affaires.

En France, les appareils constituant cette flotte sont en règle générale des multimoteurs, à moteurs à pistons encore en grande partie, quoique les appareils à turbopropulseurs (tels le Marquis produit par l'Aérospatiale, ou les King Air ou B 99 produits par la firme Beechcraft) ou à réacteurs (tels le Mystère 20, les Hawker Siddeley 125) deviennent de plus en plus nombreux. Ce sont des appareils possédant un rayon d'action d'au moins 1 000 kilomètres et, en règle générale, équipés pour le vol aux instruments. Leur pilotage exige donc que les firmes propriétaires recourent à l'emploi de pilotes professionnels titulaires de la qualification IFR, qualification qui doit être renouvelée tous les six mois. Cette dernière obligation est particulièrement contraignante pour l'industriel qui veut utiliser son appareil personnel dans l'exercice de sa profession ; c'est une des raisons qui a longtemps freiné le développement de l'aviation d'affaires privée. Cependant, comme il est indispensable que le vol d'affaires puisse être effectué par tous temps, et parfois de nuit, la qualification IFR est de plus en plus recherchée par les pilotes privés (en 1970, 64 qualifications ont été délivrées à des pilotes privés pour 216 attribuées à des pilotes professionnels). Au 1er janvier 1971 il y avait en France 22 500 pilotes privés, dont plus de 500 titulaires de la qualification IFR.

Il est difficile de donner un aperçu de l'importance de l'aviation d'affaires privée en France, faute d'enquête à ce sujet. On peut noter toutefois que le nombre d'appareils appartenant à des sociétés est proche de 700, sans que l'on puisse soutenir que ces appareils n'effectuent que des vols d'affaires. Par comparaison, on notera qu'aux États-Unis d'Amérique on range dans l'aviation d'affaires les 24 000 aéronefs appartenant à 12 000 entreprises.

3. L'AVIATION LÉGÈRE

Cette catégorie comprend tous les appareils privés autres que ceux utilisés de façon générale pour les déplacements professionnels. Cela représente pour la France environ 4 700 appareils dont la majeure partie appartient aux aéroclubs (2 600) ou à des particuliers (1 640) ; s'y ajoutent les appareils de liaison des administrations et les appareils destinés à la formation aéronautique.

Sur l'ensemble du parc français environ 3 000 appareils sont de conception ou de fabrication française. Il est à remarquer que le tiers environ des appareils de particuliers sont des machines dotées d'un certificat de navigation restreint d'aéronef (C.N.R.A.), c'est-à-dire construites par leur propriétaire, généralement d'après des liasses de plans établies par de petites entreprises.

Les aéroclubs ou associations qui pratiquent le vol à moteur ou le vol à voile atteignent le nombre de 600 et réalisent plus des trois quarts des heures de vol effectuées en France.

Le développement de l'aviation légère est favorisé en France par l'État qui intervient à différents titres :

— par l'octroi de bourses de vol aux jeunes de moins de 25 ans pour leur permettre d'effectuer des heures de vol à prix réduits ;

— par l'attribution de subventions directes aux associations ;

— par une participation aux dépenses des aéroclubs pour l'acquisition de matériels d'instruction (avions, planeurs, avions remorqueurs de planeurs et parachutes) ;

— par une contribution aux charges d'infrastructure des aérodromes d'aviation générale (338 terrains dont 251 ouverts à la circulation aérienne publique) ;

— par la formation et le perfectionnement des moniteurs de vol à moteur, de vol à voile et de parachutisme dans les centres nationaux.

L'activité des appareils d'aéroclubs peut être classée en vols locaux (80 % des mouvements estimés à près de 6 millions en 1971) effectués en vue du terrain, et en vols de voyage (20 %) entre deux terrains, généralement d'aéroclubs. La quasi-totalité de ces voyages sont effectués en régime VFR, ou régime de vol à vue.

Les brevets de pilotage auxquels préparent les aéroclubs sont de deux sortes : le brevet élémentaire de pilote privé « avion » (4 000 délivrés par an environ) qui ne permet à son titulaire que des vols locaux à moins de 20 km du terrain d'aéroclub sans possibilité d'emport de passager, et le brevet de pilote privé « avion » (2 000 par an environ) qui autorise tous déplacements avec ou sans passagers, à la seule condition qu'il s'agisse de vols non rémunérés. On doit également mentionner que les aéroclubs délivrent également chaque année environ 1 500 brevets de pilote de planeur et qu'ils ont également une importante activité dans le monde du parachutisme.

4. LE TRAVAIL AÉRIEN

4.1. Les avions-taxis. — On comprend souvent dans le travail aérien l'activité des avions-taxis comportant au maximum 8 à 10 places, bien qu'il s'agisse en l'occurrence d'un transport d'un point à un autre, de passagers ou de marchandises. Cette activité est parfois confondue avec l'aviation d'affaires.

Le transport par avion-taxi est conditionné en France à la délivrance d'une autorisation de transport aérien accordée par le ministère des Transports. Une quarantaine d'entreprises sont actuellement autorisées. Leurs flottes varient de 1 à 10 appareils, allant du monomoteur quadriplace de 180 ch (132 kW) au petit biréacteur d'une dizaine de places, type Mystère 20 ou Hawker Siddeley 125. Ces appareils sont, soit affrétés voyage par voyage, soit loués à temps par une entreprise pour assurer ses transports rapides.

4.2. Le travail aérien proprement dit. — Celui-ci se manifeste sous des formes très diverses :

— le travail agricole et la protection des récoltes : il consiste principalement dans l'épandage d'insecticides. Il est réalisé par hélicoptère, mais surtout par avion-trémie comportant un important réservoir stockeur de produits et des rampes d'épandages réparties sur toute l'envergure de l'avion ;

— l'entraînement aérien et ses activités annexes : école de pilotage, baptême de l'air, promenades aériennes et lancement de parachutistes. Les écoles de pilotes sont généralement spécialisées dans le perfectionnement des pilotes privés qui sont formés dans les aéroclubs : ce perfectionnement consiste soit à préparer les brevets professionnels soit à entraîner les pilotes privés au vol aux instruments (vols IFR) ;

— la photographie aérienne ou le tournage de séquences filmées : cette activité est soumise à une autorisation spéciale délivrée par le ministère de l'Intérieur.

— la publicité aérienne par écriture dans le ciel à l'aide de fumées ou le remorquage de banderoles (le jet de tracts étant interdit) ;

— la surveillance des oléoducs ou d'ouvrages divers : le survol des oléoducs permet de déceler immédiatement les fuites qui modifient l'aspect du sol vu des airs ;

— les recherches minières et pétrolières : effectuées à l'aide d'appareils détecteurs généralement remorqués par les aéronefs :

— les missions de secours et de sauvetage, particulièrement en montagne, dont beaucoup sont assurées par hélicoptères ; on peut ranger parmi cette activité les évacuations sanitaires (V. § 4.3).

— le levage et la mise en place de matériaux : cette activité est spécialement le fait des hélicoptères.

Ces divers travaux sont effectués en grande partie par des aéronefs légers, monomoteurs de 100 à 200 ch (75 à 150 kW) ou des hélicoptères de faible puissance, type « Alouette II » construits par la société Aérospatiale. Actuellement 230 autorisations de travail aérien ont été délivrées en France, correspondant à l'activité de quelque 300 appareils.

4.3. Missions particulières de l'Administration en France. — On ne peut traiter du travail aérien sans mentionner l'activité des appareils appartenant à des administrations de l'État.

4.3.1. La protection civile. — Elle dépend du ministère de l'Intérieur et est assurée par des services situés dans chaque département. Sur le plan aéronautique, elle se manifeste par :

— des missions de sauvetage et d'évacuation sanitaires : elles sont assurées principalement par des hélicoptères appartenant à l'État ;

— la lutte contre les incendies de forêt : l'État a acquis pour ce genre de missions une dizaine d'appareils spécialisés ; ce sont des bimoteurs à hélices Canadair (deux moteurs de 2100 ch soit 1 550 kW) qui peuvent déverser chacun cinq tonnes d'eau d'un coup sur les foyers d'incendie. À chaque sortie, les appareils font plusieurs déversements, car ils peuvent remplir leurs soutes sans atterrir, en écopant en vol l'eau de la mer ou des lacs.

On a également envisagé la lutte contre les incendies de forêts par hélicoptères géants, comme cela est pratiquée en U.R.S.S. ; on y a renoncé pour l'instant car les mouvements d'air chaud occasionnés par les incendies affectent gravement la stabilité de ces aéronefs.

4.3.2. La cartographie aérienne. — L'Institut géographique national (I.G.N.) dispose d'une flotte aérienne d'une quinzaine d'appareils basés à Creil, près de Paris, qui effectuent des travaux de prises de vues aériennes.

Ces vues aériennes servent à l'établissement de cartes à différentes échelles grâce à des appareils permettant la traduction directe en tracés géographiques des photographies réalisées. Après 1945, l'I.G.N. a commencé à s'équiper de Boeing B 17, forteresses volantes du deuxième conflit mondial, puis a acquis en 1958 des appareils français Hurel-Dubois, spécialement adaptés aux missions photographiques. Il dispose également d'un appareil biréacteur Mystère 20, dont la grande vitesse permet une couverture rapide des régions à cartographier.

UTILISATION DES VÉHICULES SPATIAUX

CHAPITRE XVII

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

1. ASTRONOMIE

L'espace fut longtemps le domaine exclusif de l'astronomie. L'observation à l'œil nu, puis à l'aide d'instruments optiques, sans cesse perfectionnés, a fourni de très nombreuses données dont beaucoup ne sont pas périmées. Cependant, comme d'innombrables étoiles « émettent » dans l'ultraviolet (étoiles dites à haute température) ou dans l'infrarouge (étoiles dites à basse température), la plupart des zones du spectre des rayonnements est inutilisable à partir du sol de notre planète avec les moyens d'observations antérieurs. La section « haute énergie » du spectre, qui va de l'ultraviolet aux rayons gamma permet d'obtenir des renseignements sur les étoiles « jeunes »; la fraction « basse énergie », entre l'infrarouge et les ondes radioélectriques ultracourtes, autorise des hypothèses importantes et sans doute déterminantes sur l'évolution de l'univers.

Les deux seules fenêtres de la bande spectrale, fenêtres qui permettaient la réception des ondes optiques assez courtes (longueurs d'onde voisines du micromètre) et les ondes hertziennes de la « gamme inférieure » (longueurs d'onde comprises entre 1 cm et 100 m) n'étaient pas suffisantes ; il fallait l'astronomie spatiale.

1.1. Place de l'astronomie dans la recherche spatiale. — Tout programme civil d'exploration de l'espace, qu'il s'agisse de ballons, de fusées-sondes ou de satellites artificiels, comporte plusieurs missions scientifiques relevant de disciplines plus ou moins voisines. Cette plurifonctionnalité a été rendue possible par la miniaturisation des équipements, ce qui était aussi une condition impérative pour la navigation aux très hautes altitudes. La juxtaposition d'appareils d'usages différents donne d'ailleurs la preuve que la spatiologie a engendré de nouvelles collaborations entre les chercheurs.

1.2. L'astronomie embarquée. — Elle a débuté dès que les astronomes, persuadés que l'atmosphère constituait un écran optique, utilisèrent l'aérostation pour faire leurs observations en altitude. Le professeur Picard, l'un des premiers, explora longuement la stratosphère et entreprit des expériences astronomiques.

Les fusées-sondes d'abord, puis les vols de satellites, circumterrestres et circumlunaires, ont permis d'obtenir de nouvelles connaissances sur l'espace. Le 12 septembre 1959 demeurera toutefois une date capitale : l'engin soviétique Lunik 2 réalisait le premier impact sur la Lune. Le 4 octobre de la même année, Lunik 3 réussissait l'exploit de photographier la face cachée de notre satellite. Ensuite Mariner IV, engin lancé par les États-Unis d'Amérique, a permis d'obtenir vingt et une vues de Mars, obtenues à des distances comprises entre 16 000 km et 10 000 km ; de nombreux cratères, ignorés auparavant, étaient visibles sur ces photos. Le satellite américain OAO-2, du programme *Orbiting astronomical observatory*, laboratoire de deux tonnes lancé en 1968, permit de déceler dans une galaxie voisine de la nôtre des sources de brillance sur la nébuleuse Andromède, ce que quinze années d'exploitation de fusées-sondes n'auraient pas suffi à mettre en évidence.

1.3. Le matériel astronomique embarqué. — Que les instruments soient actifs (leur travail étant programmé avant le lancement) ou qu'ils soient passifs (répondant à chaque demande) ils ne constituent que des dérivés de volume réduit de ceux qui sont utilisés dans les observatoires et laboratoires installés à Terre. On retrouve en petit format des appareils optiques classiques, ainsi que des appareils de prise de vue munis des filtres permettant la réception de parties déterminées du spectre des rayonnements. Des équipements de télévision et des lasers peuvent également être utilisés (fig. XVII-1). Il s'agit là de matériel inclus dans une fusée ou un satellite de navigation spatiale pure ou d'exploration de durée réduite.

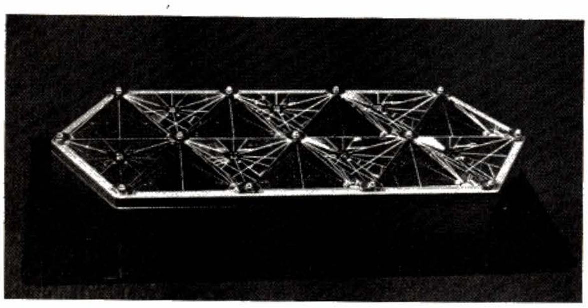


Fig. XVII-1 — Réflecteur laser « TL 1 » identique à celui déposé sur la Lune par la sonde scientifique Luna 17 (*Aérospatiale*)

Dans le cas d'une station spatiale dont les éléments doivent être lancés individuellement puis assemblés en plein espace et dont l'équipage est renouvelé, les possibilités sont différentes et plus grandes. Les chercheurs

occupant ces laboratoires disposent d'une surface et d'un volume de travail bien plus grands. Ils ont la possibilité de se servir d'appareils astronomiques dont ils dirigent le fonctionnement. Autrement dit, les optiques astronomiques, les caméras, les lasers et autres instruments, en plus grand nombre que dans les autres satellites et de fiabilité supérieure, sont directement commandés par eux, sur indication de la Terre ou non, et peuvent servir à des observations non programmées. Il s'agit là véritablement d'un observatoire avancé.

2. ÉTUDE DU MILIEU SPATIAL

2.1. Utilité des satellites. — La nature des composants du milieu spatial, considéré primitivement comme un vide interstellaire, a été entrevue lorsque les physiciens se sont associés aux astronomes, mais il a fallu attendre la récente époque où l'analyse approfondie de la matière débutait pour que les bases de la connaissance de l'espace soient jetées. Il y eut d'abord une analyse des couches les plus proches de l'atmosphère, puis une observation des mouvements externes qui s'y manifestaient. L'optique, les ballons-sondes, plus récemment, les fusées firent progresser cette connaissance. Il manquait encore l'étude *in situ* qui seule peut corriger, préciser, augmenter les données précédentes. Dès sa mise au point le satellite apparut à juste titre comme l'observatoire idéal.

La technologie spatiale progressant à un rythme accéléré et instaurant cette fiabilité spatiale devenue un critère pour plusieurs industries, il a été rapidement possible de séjourner dans le milieu et, ainsi, des résultats déterminants ont été obtenus. Maintes subdivisions de la recherche fondamentale se sont portées participantes à cette expérimentation spatiale notamment aux États-Unis d'Amérique, en France (fig. XVII-2), en Allemagne fédérale, en Grande-Bretagne.

Le professeur J. E. Blamont, physicien français, lauréat de la NASA, en a conclu : « Pour la première fois dans l'histoire des sciences, il semble qu'un certain nombre de problèmes fondamentaux, que la physique avait laissés provisoirement de côté comme insolubles vont pouvoir recevoir des solutions fondées sur l'observation : nature de l'espace-temps, histoire de l'univers depuis sa création, processus de la nucléogénèse, évolution des étoiles et des systèmes stellaires, origine de la vie, formation du système solaire ». Il a cependant pris soin d'ajouter que les instruments actuels « ne représentent en réalité que des balbutiements de la technologie, mais qui permettent de mettre sur pied un système rentable ».

2.2. Programmes d'études. — La mission première des grands satellites-observatoires est de mener à bien une étude systématique et coordonnée de l'atmosphère terrestre, de la magnétosphère, des relations entre l'espace terrestre et l'espace solaire, et de l'espace cislunaire. Pour ce faire, les chercheurs et ingénieurs de la NASA, ou travaillant en relation avec elle, ont construit différents instruments scientifiques qui sont « intégrés » dans chaque système, suivant des normes très strictes.

L'idée seconde, déterminant un tel programme et justifiant également son développement, est de créer et d'améliorer progressivement, pour chaque mission, un type assez standardisé d'observatoire scientifique pouvant être mis sur orbite périodiquement et suivant un « planning » bien établi par avance. Il a donc fallu faire un choix scientifique des conditions et des moyens de lancement ainsi que des orbites (presque circulaires ou très elliptiques et diversement inclinées par rapport à l'équateur), choix établi essentiellement en fonction des différentes missions de chaque projet.

Les divers instruments scientifiques placés dans ces satellites ont les fonctions générales suivantes (fig. XVII-3) :

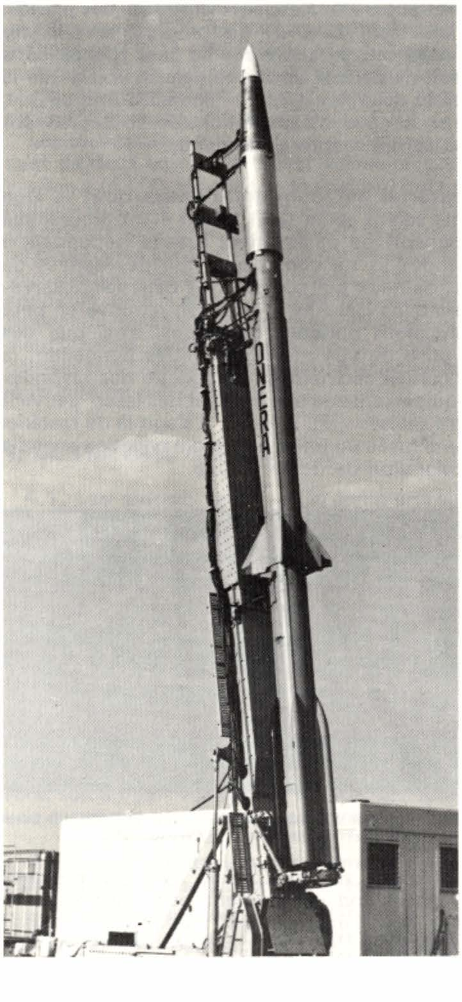


Fig. XVII-2 — Fusée expérimentale Tibère (*O.N.E.R.A.*)

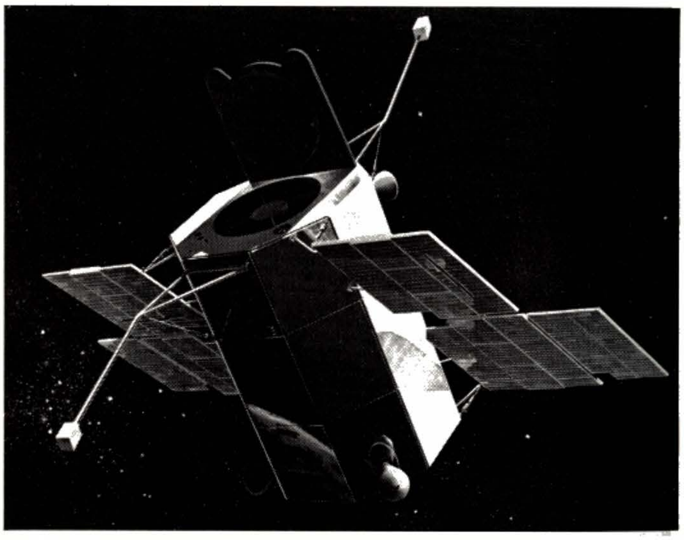


Fig. XVII-3 — Satellite OAO (*NASA*)

— *Astronomie :* contrôle des mesures faites dans l'ultraviolet, dans le domaine des rayons X et des rayons gamma et dans les basses régions du continuum de fréquences.

— *Physique solaire :* mesure de l'évolution des rayons ultraviolets, des rayons X et des rayons gamma, compte tenu des résultats obtenus soit par observation terrestre, soit par instrumentation spatiale, pour comprendre les processus solaires et leurs effets sur la Terre.

— *Particules énergétiques :* recherches sur la composition, le flux, les caractéristiques d'orientation, les variations du spectre d'énergie de particules comme les électrons, les protons, les rayons gamma, évoluant plus ou moins loin de la Terre ou tombant à sa surface.

— *Champs magnétiques et radiations :* étude du champ magnétique terrestre, de l'évolution des phénomènes atomiques dont les profils seront tracés jusqu'à la première zone de Van Allen.

— *Structure atmosphérique et météorologie :* mesure de la pression, de la température, de la composition et de la densité des atmosphères terrestre et cislunaire.

— *Tests planétaires :* mesures des propriétés des surfaces et des couronnes planétaires. Ces études sont les préliminaires d'expériences à faire au moyen de satellites « spécialisés ».

— *Ionosphère :* étude de la densité électronique et ionique, des particules, des températures et de la composition des ions depuis les basses couches de l'atmosphère jusqu'à l'espace interplanétaire. Recherche de l'effet de ces particules sur la propagation des ondes.

— *Rayonnements particuliers :* mesure de la raie Lyman-α par les méthodes de l'intensité d'absorption, des rayons cosmiques et de la lumière polarisée venant de l'espace interplanétaire.

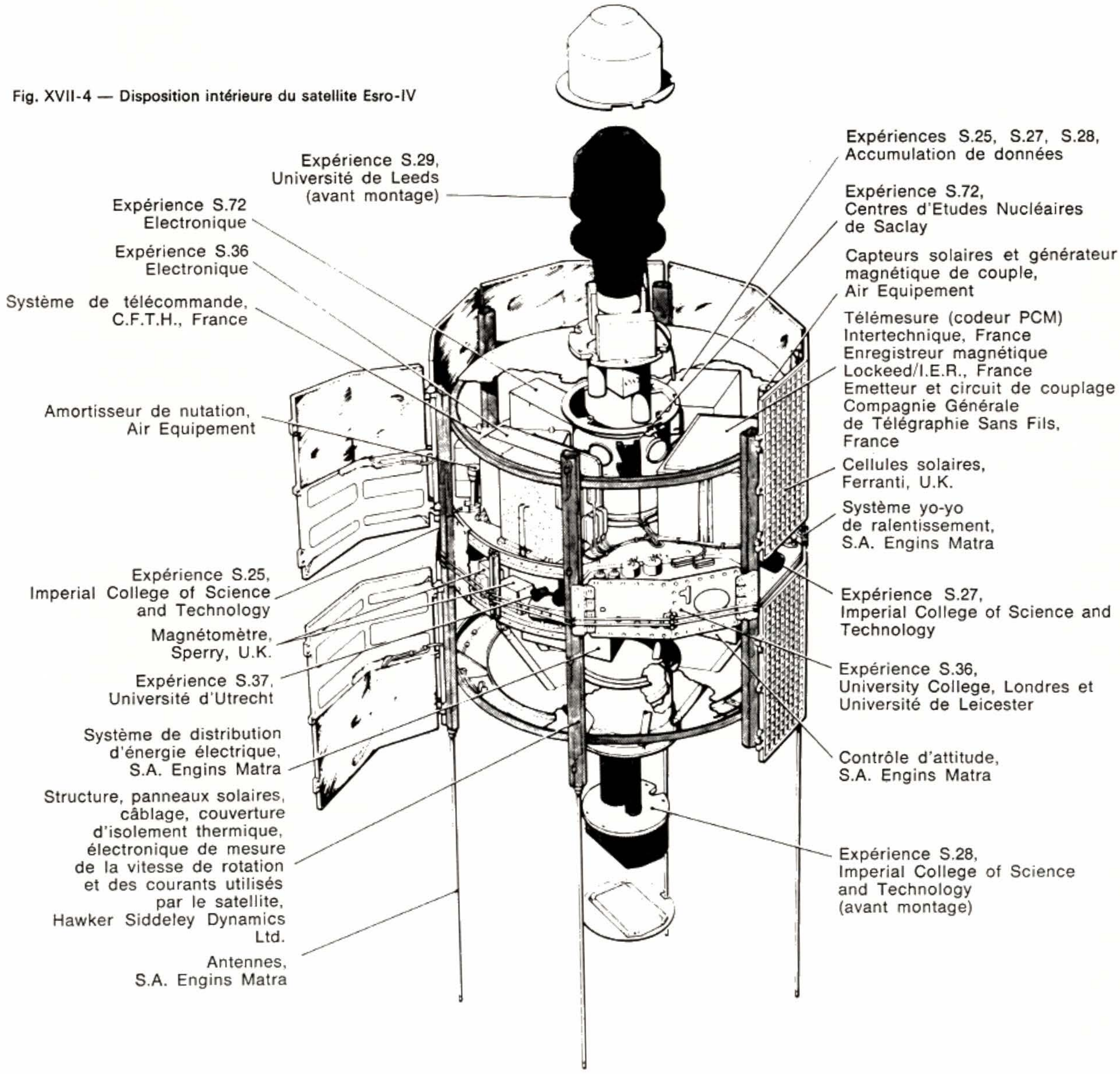
— *Étude des phénomènes atomiques lumineux :* lumière nocturne et diurne de l'hydrogène atomique, de la résonance de l'hélium solaire. Mesure de l'albedo de la Terre et de la lumière réfléchie du Soleil sur la surface cachée de la Lune.

— *Particules énergétiques :* détection des particules : électrons dont l'énergie est supérieure à 60 keV et protons dont les énergies sont supérieures à 2 MeV.

Par ailleurs, la mission essentielle des observatoires type OAO est d'étendre la connaissance de l'origine et du développement de l'univers au profit de l'homme.

2.3. Qualification du matériel. — Les cahiers des charges de toute instrumentation embarquée sont particulièrement exigeants dans le cas d'études en milieu spatial. Le satellite-laboratoire automatique Iris-Esro-IV (fig. XVII-4), de l'Organisation européenne de recherche spatiale qui, opérationnel pesait au total 74 kg, avait une charge utile scientifique de 21,316 kg seulement. Malgré le volume disponible très faible, grâce à une technologie très avancée il emportait tout le nécessaire pour réaliser sept expériences-programmes : un ensemble hétérogène de capteurs de phénomènes, des émetteurs transmettant les données aux stations d'écoute et des récepteurs permettant de recevoir des ordres de contrôle de ces mêmes stations. Les fournisseurs du matériel spatial doivent s'entourer de précautions particulières jusque dans les détails des instruments d'expériences. C'est la raison d'être des « salles blanches », pièces stériles ayant pour but d'éliminer toute « contamination ». Sous l'effet du rayonnement solaire la moindre trace de doigt, le plus petit dépôt organique se

Fig. XVII-4 — Disposition intérieure du satellite Esro-IV



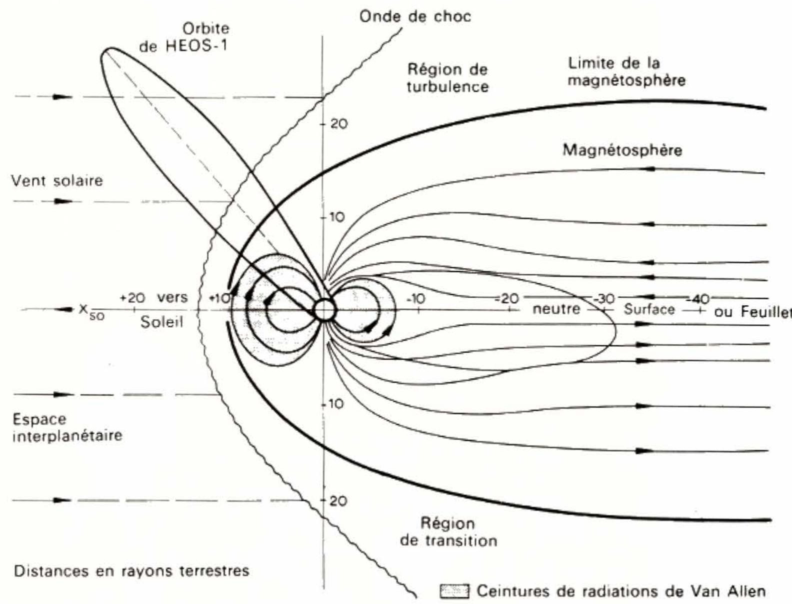
transforme en trace noire de carbone. Le coefficient d'absorption peut ainsi augmenter dans des proportions telles qu'un échauffement se produit et cela peut être préjudiciable au fonctionnement des équipements. De plus, dans l'espace des matériaux se subliment ; ils deviennent des gaz dont les molécules se déposent sur les surfaces des divers appareils installés à bord.

2.4. Complexité des expériences. — Tout un programme français, réalisé par ballons et fusées-sondes, a été consacré à l'exploration globale de grandes régions du ciel jusqu'à 10 000 degrés carrés. Une carte mondiale de notre atmosphère terrestre a pu être établie par les expériences du satellite américain OGO-VI, qui a mesuré la largeur de la raie 6 300 angströms (0,63 μm) de l'oxygène atomique (fig. XVII-5).

Heos-1, autre satellite de l'Organisation européenne, lancé le 5 décembre 1968 au cap Kennedy, a étudié pendant une période d'activité maximale l'espace interplanétaire qui reçoit les influences de deux facteurs : le champ magnétique terrestre et le « vent solaire ». En outre, le programme d'études comportait la détermination de l'influence qu'exerce sur ces deux facteurs l'onde de choc due au déplacement de la Terre dans l'espace. Le septième satellite européen, Esro-IV, réussit des expériences relatives, en particulier, à la nature des ions, à leur distribution d'énergie, à leur vitesse de dérive, à leur densité totale, à la composition et à la densité totale du gaz neutre dans la haute atmosphère et l'exosphère, au mécanisme de la précipitation des particules de faible énergie dans les zones aurorales, aux événements d'absorption polaire, à la mesure du flux et de la distribution d'énergie des particules piégées dans la première ceinture de radiations de la Terre et des particules d'origine galactiques.

Fig. XVII-5

Orbite d'Heos-1 peu après le lancement et caractéristiques du milieu spatial au voisinage de la Terre



Chacune de ces expériences se traduit par une quantité importante de données à exploiter. L'engin américain, Courier-IB, en dix-huit jours, a recueilli cent dix-huit millions de renseignements et la sonde Pioneer, en 1965, a envoyé quatre-vingts millions de données relatives au milieu spatial, aux champs magnétiques, au vent solaire, à la densité des électrons. À Terre, bien que ce soient des ordinateurs qui servent aux dépouillements des résultats, il n'en reste pas moins que la masse de documents récoltée est telle que de longs mois sont nécessaires pour que son étude soit achevée.

3. ÉTUDE DES PLANÈTES

3.1. Approche du problème. — L'étude du système solaire, ou plus exactement notre système solaire puisqu'il existe d'autres corps célestes autour desquels gravitent des masses de diverses natures, à l'aide de satellites, présente un intérêt particulier.

L'utilité de ces explorations du Soleil, des autres planètes, de la Lune, réside dans le fait que notre propre Terre, comme les autres composants du système, constitue un éclat d'un tout. Le chercheur qui prospecte les données intrinsèques de la Terre manque de comparaisons dans le temps et dans l'espace. L'approche du problème consiste donc à dresser le catalogue des données terrestres en vue de les confronter à celles des autres planètes et du Soleil lui-même.

Cependant, étant donné les distances à parcourir, de nombreux problèmes de navigation se posent : le Soleil est à 149,6 millions de kilomètres de la Terre, exactement à une unité astronomique (ou U.A.), Vénus à 43 millions de kilomètres et Jupiter à plus de 550 millions de kilomètres. Ces distances apparaissent cependant pouvoir être parcourues dans un avenir plus rapproché que celle qui nous sépare de l'étoile Alpha du Centaure (40 000 milliards de kilomètres, soit 4,3 années de lumière) où existerait un élément de vie.

Si la prudence scientifique est de rigueur dans ce domaine à peine défriché, les premiers résultats obtenus lors des explorations lunaires ont permis de justifier l'utilité de telles entreprises.

3.2. Le système solaire. — Rappelons que le Soleil est une étoile au sens propre du terme, qui se présente avec une consistance encore mal définie. C'est un corps incandescent de 1 400 000 km de diamètre ; en son point central la température a été évaluée théoriquement à quinze millions de kelvins (ce qui représente sensiblement 15.10^6 °C). À un pour cent près il constitue à lui seul la totalité de la masse du système solaire. Son aspect le plus remarquable résulte d'une activité thermonucléaire permanente, quoique d'intensité variable, selon un cycle d'environ une décennie. Cette activité se traduit par des rayonnements.

Tout aussi intéressant est l'environnement solaire dont la nature et plus encore la mobilité sont peu à peu précisées par les expériences spatiales successives. Cette sphère en fusion est entourée de trois zones qui sont, à partir de sa surface : la *photosphère* (température : 6 000 K environ) siège de l'émission lumineuse, la *chromosphère*, de 10 000 km d'épaisseur (température : 10 000 K) et la *couronne solaire* (température : 1 000 000 K). Les fusions nucléaires qui se produisent du fait de la haute température, et qui sont à l'origine des radiations électromagnétiques, se traduisent par une diminution de masse apparemment élevée : quatre millions de tonnes à la seconde ; en réalité cela est négligeable puisqu'il faudrait compter par milliards d'années de notre calendrier pour que le diamètre solaire

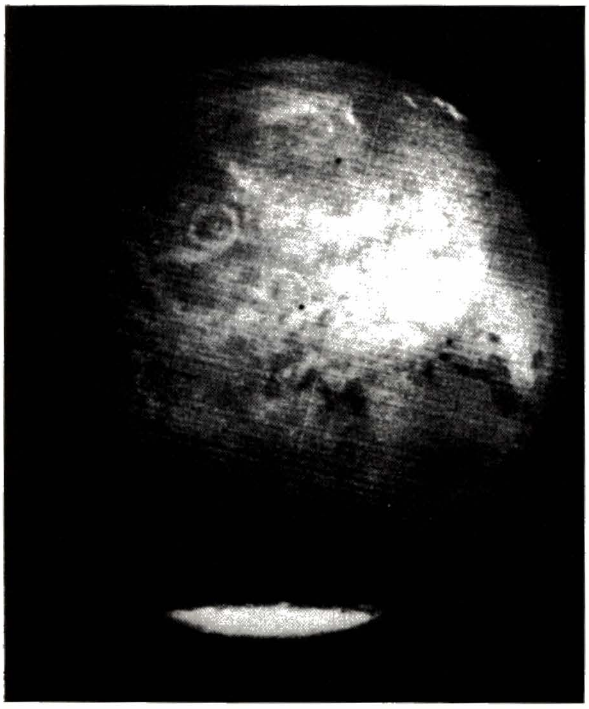


Fig. XVII-6 — Vue de la planète Mars prise par le satellite Mariner 7 (*NASA*)

décroisse de cent kilomètres. Les éléments qui quittent la couronne solaire, plasma ou vent solaire, en se déplaçant dans l'espace prennent la forme d'une écharpe irrégulière autour des planètes (dont la Terre), des comètes et aussi des satellites artificiels.

Dans ce domaine l'apport de l'exploration spatiale s'est avéré capital.

Cependant, le défrichage de l'énigme solaire nécessitera sans doute plusieurs siècles.

Parmi les autres composants du système solaire, nous distinguerons les neuf planètes et leurs satellites naturels :

— La Terre (un satellite : la Lune) ;
— Mars (deux satellites) (fig. XVII-6) ;
— Jupiter (douze satellites) ;
— Saturne (neuf satellites) ;
— Uranus (cinq satellites) ;
— Neptune (deux satellites) ;
— Pluton ;
— Mercure ;
— Vénus.

En outre, selon des orbites qui s'insèrent entre celles de Mars et de Jupiter, donc très loin de la Terre, gravitent des astéroïdes ou planétoïdes, petites planètes, dont 1 500 ont déjà été dénombrés, mais dont le total pourrait atteindre 50 000 unités, et dont le diamètre serait compris entre 1,6 km et, pour Cérès, le plus volumineux répertorié, 770 km.

En raison de sa proximité de la Terre, la Lune avait déjà été bien étudiée avant son exploration par l'homme. Néanmoins, celle-ci a permis de tirer plusieurs leçons de caractère scientifique.

La première photographie de la face visible de la Lune, envisagée par l'astronome français Arago dès 1816, fut obtenue en 1840 par l'Américain K. W. Draper avec un téléscope de Newton (temps d'exposition : vingt minutes). Le premier impact sur la Lune fut celui de la sonde soviétique Lunik 2, le 12 septembre 1959 ; rappelons que la face cachée a été photographiée le 4 octobre de la même année, par Lunik 3. Depuis 1959, les renseignements sont devenus de plus en plus nombreux. En 1964, la sonde américaine Ranger 7 permit d'obtenir 4 308 photographies de la Lune ; en 1965, Ranger 8 en prit 7 137 et, en 1966, Surveyor 1 en prit 11 150. Des échantillons lunaires ont été prélevés par un engin soviétique télécommandé qui les a ramenés à Terre, puis directement par des astronautes américains, lors de leurs débarquements. Cependant, une telle quantité et une telle qualité de documents, unique dans l'histoire des sciences, a moins apporté de données définitives qu'elles n'ont élargi le champ des investigations spatiales. Certes, grâce aux témoins géologiques examinés sur place ou rapportés à Terre, il a été possible de mieux connaître l'histoire de la Lune mais il sera longtemps impossible d'augmenter cette connaissance faute d'examens suffisants sur toute la superficie.

Les études des laboratoires, la mise au contact des échantillons lunaires de différents éléments terrestres n'ont pas permis de déceler une incubation qui aurait prouvé l'hypothèse d'une biogénèse lunaire analogue à celle de la Terre. Toutefois, le contact de ces échantillons avec certaines de nos végétations en état de croissance a agi comme un fertilisant sans qu'une explication puisse être donnée. La nature même de la Lune, si avidement recherchée pour l'approche de l'hérédité cosmique de notre planète, a également été entrevue grâce au bombardement du sol lunaire après installations de sismographes actifs.

L'exploration lunaire qui a été réussie plusieurs fois par les astronautes américains des missions Apollo, par les engins automatiques soviétiques et les sondes de ces deux pays a constitué un exercice scientifique de haute portée. Mais la Lune, selon l'expression d'un savant de l'Académie des sciences de Moscou, n'est qu'un polygone de départ pour des missions vers d'autres planètes plus lointaines.

3.3. Exploration des autres planètes. — La recherche, la poursuite d'une explication des origines de notre planète et l'utilisation éventuelle sur la Terre des données recueillies dans l'espace et les corps qui l'habitent, exigent une exploration sans limite théorique de distances.

Mars présente un intérêt scientifique important en raison d'apparences de vie qu'il est malaisé de déterminer en dehors d'observations directes sur place. L'intérêt que suscite cette question est tel que la recherche de sa solution constitue un des buts essentiels de l'exploration spatiale. À la distance minimale de la Terre de cinquante-six millions de kilomètres, c'est la planète la plus proche où l'on a pu déceler des conditions biogénétiques élémentaires. Sans doute des illusions optiques, relayées depuis le XIXe siècle, ont permis d'imaginer la présence d'eau et même de végétation. On suppose encore qu'il y existe une vie cellulaire mais aucun autre moyen que l'atterrissage de véhicules ne semble devoir infirmer ou confirmer cette hypothèse.

La sonde américaine Mariner-IV, lancée le 28 novembre 1964, prit le 15 juillet de l'année suivante une vingtaine de photographies d'excellente qualité, entre seize et dix mille kilomètres de Mars. Les quarante mille « points » composant chaque vue, furent analysés des mois durant par des machines électroniques et révélèrent un sol plus tourmenté que celui de la Lune. Une autre découverte laisserait à penser que l'atmosphère de Mars comporterait du gaz carbonique, alors que précédemment il était admis qu'il y avait surtout de l'azote, mêlé à du gaz carbonique, avec des traces d'oxygène et de vapeur d'eau.

Vénus est le troisième corps céleste, dans l'ordre d'intérêt, qui retient l'attention des savants et suscite la programmation de missions spatiales. Indûment prénommée jadis Étoile du Berger, elle présente une brillance supérieure à celle de toutes les autres planètes observées. Son atmosphère a été reconnue nuageuse et turbulente. Son diamètre, (12 300 km), sa masse volumique moyenne (4,85 g/cm^3), son accélération de pesanteur en surface, ses distances de périhélie et d'aphélie et sa vitesse d'orbitation l'apparentent à la Terre. Une connaissance plus approfondie donnerait donc des points de comparaison. Elle est cependant affectée d'une température élevée, probablement de 700 °C, ce qui créerait des problèmes thermiques pour un atterrissage. La sonde Venus IV, lancée le 12 juin 1967 et qui a touché Vénus le 19 octobre, a détecté dans l'atmosphère vénusienne 90 % à 95 % de gaz carbonique, 0,4 % d'oxygène, 1,6 % de vapeur d'eau. La pression atmosphérique correspond à vingt-deux fois celle de la Terre et des vents y soufflent à 700 km/h.

Jupiter, à plus de 550 millions de kilomètres de la Terre, est la plus volumineuse des planètes du système (139 790 km de diamètre et plus de mille fois le volume de la Terre).

Les sondes automatiques américaines Pioneer X et Pioneer XI ont été conçues pour son étude. Une de ses particularités est la Grande tache rouge, ou Œil de Jupiter, qui a une longueur de 48 000 km et une largeur de 13 000 km ; de la Terre, et même hors de la proximité de la planète jovienne, on ne peut savoir s'il s'agit d'une gigantesque colonne de gaz ou d'un amas de glace d'hydrogène. Elle est perceptible tous les trentenaires et sa couleur serait due, selon quelques hypothèses, à des composés organiques en suspension. Autre inconnue parmi d'autres : la chaleur solaire qui atteint Jupiter n'est que la vingt-septième partie de celle qui chauffe la Terre, mais cette planète en réfléchit trois fois plus qu'elle n'en reçoit, ce qui donne à penser qu'elle possède une source d'énergie complémentaire.

Qu'il s'agisse donc du Soleil, de la Lune, des planètes principales du système solaire et, à plus forte raison, des autres corps célestes, aucune étude à distance ne pourra jamais supplanter l'étude à leurs frontières, ou sur leurs sols lorsque c'est possible, c'est-à-dire l'étude spatiale.

4. LES GRANDS SATELLITES OBSERVATOIRES

Parallèlement aux projets Telstar, Relay, Syncom et Intelsat 1, 2 3 et 4 de communications par satellites, l'Administration américaine pour l'aéronautique et l'espace (la NASA) s'est engagée dans un vaste programme de recherches spatiales afin d'obtenir de nombreux renseignements quant à la connaissance de l'univers et aux futurs développements techniques spatiaux. Ce programme d'études (commencé en 1962) comprenait trois grands projets :

— l'observatoire géophysique orbital : OGO ;
— l'observatoire solaire orbital : OSO ;
— l'observatoire astronomique orbital : OAO.

Trois séries de satellites ont déjà été mises sur orbite : il s'agit chronologiquement de l'OSO, de l'OGO et de l'OAO.

4.1. L'observatoire géophysique. — En ce qui concerne les orbites, leurs caractéristiques sont les suivantes :

Observatoire géophysique à orbite excentrique :

Inclinaison de l'orbite : 31° ± 1°
Périgée : 279 km ± 28 km
Apogée : 1111,80 km ± 9,3 km.

Observatoire géophysique à orbite polaire :

Inclinaison de l'orbite : 90° ± 1°
Périgée : 370,6 km ± 28 km
Apogée : 1111,8 km ± 55 km.

La structure géométrique du corps du satellite mesure 1,70 m de long, 0,78 m de haut et 0,81 m de large. C'est la plus grande face du satellite qui est toujours orientée vers la Terre. Les panneaux solaires fournissent la puissance électrique à l'observatoire et sont montés au bout d'un arbre qui traverse le corps. Le système de contrôle en altitude, dont les tuyères de jet sont placées en bout d'arbre pour augmenter le bras de levier, oriente les cellules solaires au silicium vers le Soleil de telle façon que la grande face du corps du satellite soit dirigée perpendiculairement à la ligne Soleil-observatoire, avec une précision de ± 2 degrés. Ainsi, les deux faces non illuminées par le Soleil peuvent être utilisées pour dissiper la chaleur en excès. Les OGO possèdent également des boîtes montées à l'extrémité d'un arbre et qui peuvent tourner sur elles-mêmes : ce sont les OPEP dont la face principale est perpendiculaire au plan d'orbite, et les SOEP orientés vers le Soleil.

Deux longs bras, mesurant près de 6,7 m de long, permettent des expériences particulièrement sensibles. Quatre bras très courts ont été étudiés pour permettre l'installation à l'extérieur du satellite d'instruments à angle d'observation très grand. De plus, les antennes de télémesure et de poursuite sont fixées au bout de bras différents, de telle façon que leurs diagrammes de rayonnement ne soient pas situés dans le champ de vue d'instruments montés dans le corps du satellite.

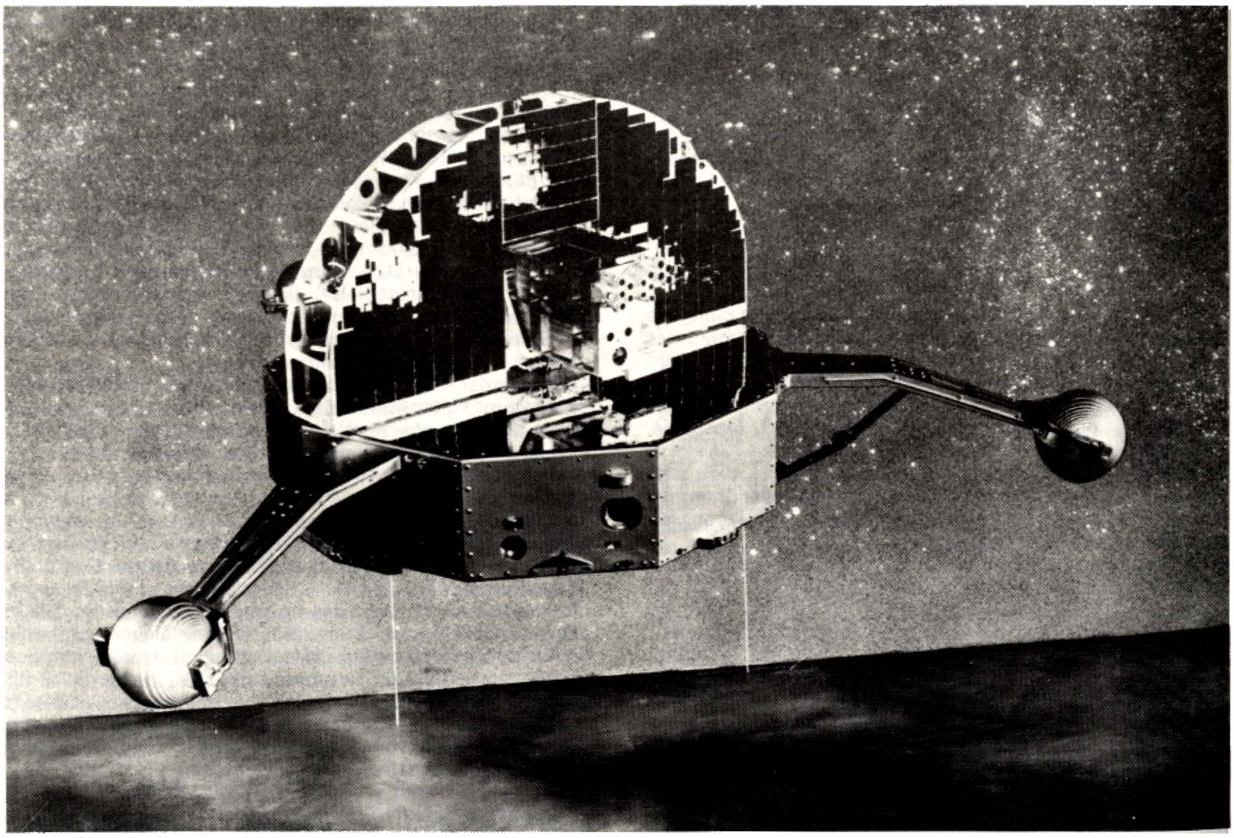


Fig. XVII-7 — Observatoire solaire orbital OSO (*NASA*)

4.2. L'observatoire solaire. — Le premier OSO, a été lancé avec succès le 7 mars 1962. Ce vaisseau spatial fut stabilisé sur une orbite voisine d'un cercle d'apogée de 550 km et inclinée par rapport à l'équateur de 33 degrés. La durée de vie avait été prévue égale à six mois (fig. XVII-7).

L'idée originale, qui est celle de l'observation du Soleil, implique que la partie du satellite qui contient les cellules solaires et les instruments soit constamment pointée vers le Soleil. Cette structure est appelée la « voile ». C'est un cadre finement structuré, semi-circulaire de 1,10 m de diamètre environ, couvert entièrement par les cellules solaires et qui soutient le système de pointage vers le Soleil. Derrière les cellules solaires sont placées les parties électroniques et mécaniques secondaires des systèmes orientés suivant la ligne satellite-Soleil. Les équilibres statique et dynamique des instruments sont d'ailleurs très importants: leur latitude de pointage, et conséquemment leur dérive, sont essentiellement fonction de cet équilibre. L'erreur de pointage a été fixée au maximum à 1 minute d'arc.

La deuxième partie du satellite, la base, est une « roue » à neuf faces de 1,10 m de diamètre, haute de 23 cm environ qui tourne autour d'un axe principal à la fréquence d'une demi-révolution par seconde. La stabilité de l'ensemble est obtenue au moyen d'un système de trois bras de levier au bout de chacun desquels est accrochée une boule. Lorsque le satellite est placé sur son orbite, les trois bras sont déployés sous l'effet de la force centrifuge et leurs extrémités déterminent un plan de stabilisation parallèle au plan de la roue. L'équilibre dynamique du satellite est assuré au moyen d'un ballast qui est déplacé suivant l'un des trois axes orthogonaux: ainsi, l'axe principal d'inertie varie dans les limites de $\pm$ 2 degrés.

La masse totale du satellite est d'environ 250 kg. Il a été lancé au moyen d'une fusée Delta simple, sans moteur auxiliaire du type TAD.

La version « avancée » de l'observatoire solaire AOSO a eu pour objectif essentiel d'obtenir une précision de pointage de $\pm$ 5 secondes d'arc (ce qui représente, vue de la Terre, une surface de Soleil de 3 200 km de diamètre), l'angle de révolution des instruments pointés vers le Soleil étant de $\pm$ 1 seconde d'arc. La masse totale étant de 500 kg environ, une fusée Thor-Agena a été nécessaire pour envoyer cet observatoire solaire sur une orbite de 550 km, polaire et approximativement circulaire (fig. XVII-8).

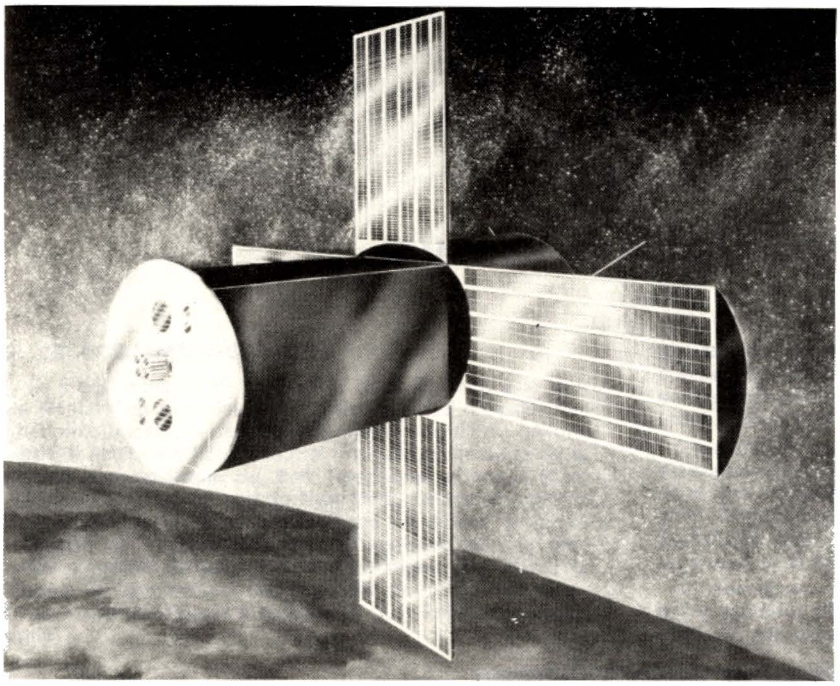


Fig. XVII-8

Observatoire solaire AOSO (*NASA*)

4.3. L'observatoire astronomique OAO. — Ce vaisseau spatial de 650 kg environ a été mis sur une orbite d'altitude de 800 km et inclinée de 31 degrés par rapport à l'équateur, par une fusée Atlas-Agena D de la base de lancement atlantique.

La structure a été étudiée de telle façon qu'un minimum de modifications soient nécessaires pour « intégrer » un instrument nouveau et l'ensemble a été calculé compte tenu d'une probabilité de 70 pour 100 d'une année sur orbite.

Cet observatoire astronomique consistait en un corps octogonal de deux mètres entre faces et de trois mètres de haut. L'instrumentation scientifique était montée dans un tube central de 1,20 mètre. De petits instruments secondaires pouvaient être placés dans la partie supérieure du corps du satellite.

Six systèmes de poursuite d'étoiles *Star-trackers* ont été montés à l'intérieur de telle façon que l'orientation du satellite suivant les trois axes soit au maximum de $\pm$ 45 degrés. Après orientation sur orbite, un système volet-panneau rabattable protégeait les instruments de la lumière solaire ou de lumières parasites intenses qui auraient détérioré les instruments optiques et empêché tout pointage vers un corps de la sphère céleste avec une précision de une minute d'arc.

Un détecteur optique, lié au système de contrôle, a été étudié de façon à atteindre une précision de pointage de 0,10 seconde d'arc dans une deuxième phase.

CHAPITRE XVIII

AUTRES APPLICATIONS

1. TÉLÉCOMMUNICATIONS

Le 9 décembre 1960 en France, dans le Cher, à la tour de Nançay, les ingénieurs du Centre national d'études des télécommunications captèrent le signal modulé du ballon-satellite américain Echo I, lequel relayait un message de la station expérimentale de Bell Telephone, située à Hom Holmdel, à 60 km au sud de New York. Le système devint opérationnel le 11 juillet 1962 lorsque fut reçue à la station française de Pleumeur-Bodou (Côtes-du-Nord), la première émission de télévision transatlantique (fig. XVIII-1). Depuis les applications des satellites aux télécommunications n'ont cessé de se multiplier (V. t. 2, Télécommunications).



Fig. XVIII-1

Première image de télévision reçue à Pleumeur-Bodou par l'intermédiaire d'Early Bird le 11 juillet 1962 (*C.N.E.T.*)

À l'origine, furent utilisés des satellites dits passifs, en particulier les ballons Echo I et Echo II d'un diamètre d'une trentaine de mètres, n'ayant qu'une fonction de réflecteurs. Leurs successeurs furent les satellites actifs, capables d'amplifier les ondes reçues, c'est-à-dire de compenser leur affaiblissement avant de les retransmettre. Les premiers satellites de télécommunications étaient à défilement : en d'autres termes leur vitesse de déplacement autour de la Terre était inférieure à celle de la rotation de notre planète ; cela provoquait des temps morts pour la réception normale. Les satellites géostationnaires ou géosynchrones (fig. XVIII-2 et XVIII-3) qui tournent autour de la Terre à une vitesse telle qu'ils restent toujours à la verticale des mêmes points (ce qui les fait paraître immobiles) permettent d'éviter cet inconvénient. Ces satellites géosynchrones sont placés sur une orbite circulaire, dans un plan équatorial, à 36 000 km d'altitude.

La distance optimale des télécommunications spatiales est supérieure à 800 km ; cela explique l'emploi des satellites dans des réseaux nationaux des pays comme les États-Unis d'Amérique, le Canada, l'Union des Républiques Socialistes Soviétiques, en raison de l'étendue de leurs territoires, et dans des réseaux internationaux.

La couverture de l'ensemble des terres habitées, hormis celles qui sont situées à une latitude supérieure à 80°, est obtenue par trois satellites sur orbite géostationnaire, le premier pour l'Atlantique, le second pour le Pacifique, le dernier pour l'océan Indien.

2. LA PRÉVISION MÉTÉOROLOGIQUE

La forme, l'amplitude, l'intensité, la direction et la durée de nombreux phénomènes qui se déroulent dans l'atmosphère terrestre (jusqu'à l'altitude de 80 km) rendent malaisées les prévisions. Pendant longtemps l'extrapolation, à partir d'un échantillonnage de situations atmosphériques, a été la seule méthode possible de prévision. Pour améliorer celle-ci il est nécessaire de disposer d'un très grand nombre de données et c'est pourquoi l'Organisation météo-

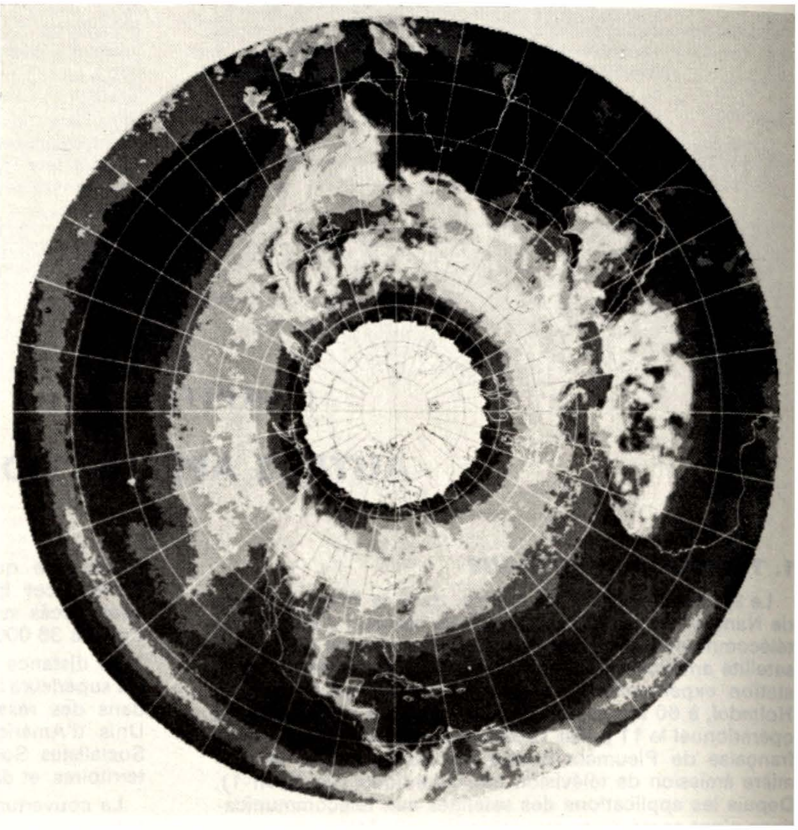
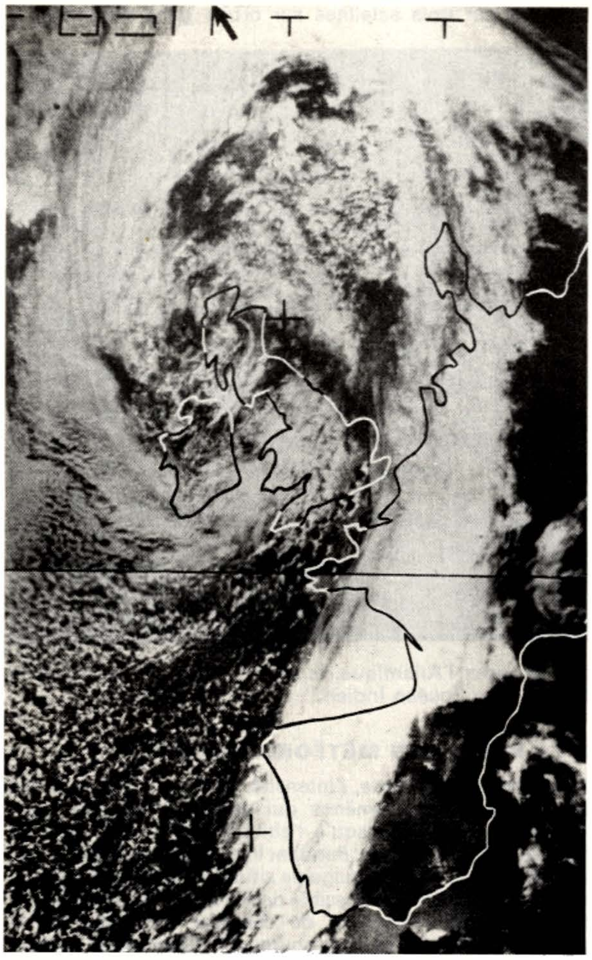


Fig. XVIII-2

Nébulosité moyenne : synthèse faite à partir de photographies individuelles données par les satellites entre 1967 et 1970
(*d'après « Global atlas of relative cloud cover » US department of commerce*)

Fig. XVIII-3

Image reçue d'Essa 8 (altitude 1 500 km) à Lannion : perturbation s'étendant du Portugal aux Pays scandinaves, à l'ouest, arrangement des cumulus isolés (*Météorologie nationale*).



rologique mondiale, dont les origines remontent à 1873, s'est attachée avec le concours des pays qui adhèrent à ses statuts, à multiplier les stations d'observation sur toute la surface de la Terre et à les doter de moyens de communications rapides. À cette fin, l'institution spécialisée a établi la « veille météorologique mondiale » et mobilisé à son service 8 500 stations à terre, 5 500 navires de commerce, un nombre important d'avions et de navires météorologiques et des stations météorologiques automatiques de satellites (fig. XVIII-2). C'est l'entreprise la plus systématique jamais tentée dans ce domaine et qui s'approche le plus de l'observation « globale ». Pour exploiter de façon systématique ces informations, on utilise des moyens informatiques de grande puissance. Ainsi, le service météorologique du Canada utilise, pour les données limitées à l'atmosphère nationale, un ordinateur capable d'intégrer quinze millions de renseignements par seconde.

La météorologie a fait appel aux véhicules spatiaux sans pour autant se priver des stations terrestres et de leurs équipements (radars d'observation de précipitations, radars-vent, télémètres, enregistreurs de nuages, instruments de sondage pour les couches de basse atmosphère).

Dès 1960 le satellite américain Tiros I, et les suivants de la série, opérationnels à une altitude de 700 km, envoyèrent des centaines d'images quotidiennement grâce à leurs deux caméras de télévision embarquées (une caméra munie d'un grand angulaire et l'autre d'une lentille télescopique ; fig. XVIII-3). L'adjonction de systèmes infrarouges permit d'obtenir des physionomies affinées et antérieurement inconnues des incidents météorologiques. Dès l'introduction de l'observation à partir de l'espace, des prévisions de grand intérêt pour la sauvegarde des vies humaines ont pu être faites (fig. XVIII-4). En 1961, Tiros III a transmis automatiquement des photographies d'une tornade de 100 km de diamètre, dénommée Carla, qui se dirigeait à la vitesse de 280 km/h vers le Texas. Le dispositif d'alerte, aussitôt appliqué par les autorités américaines, permit l'évacuation d'un demi-million de personnes. Il y eut bien sans doute vingt-cinq morts au passage de la tornade mais un cyclone de moindre amplitude, s'abattant sur la même région, avait fait auparavant six mille victimes.

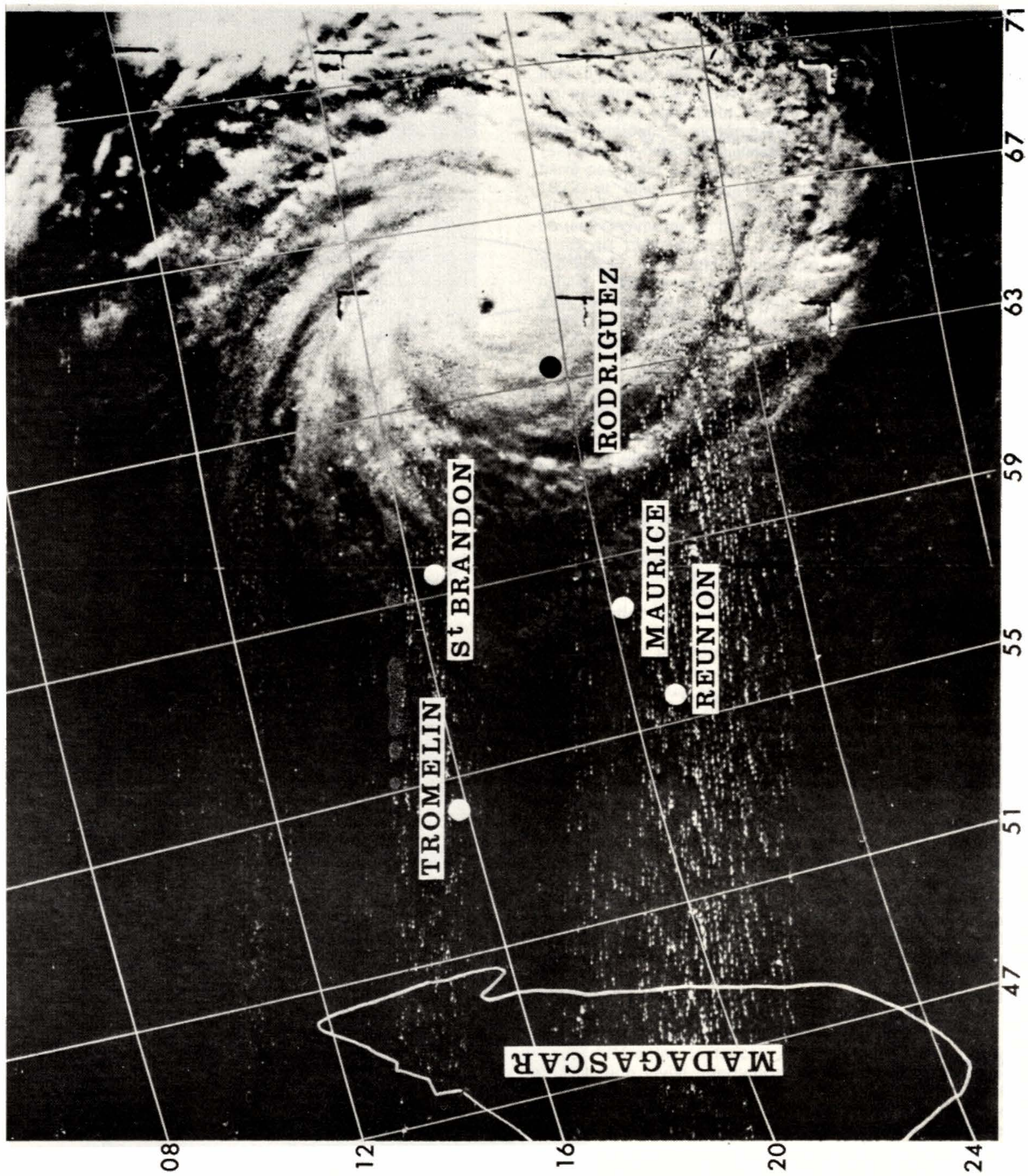


Fig. XVIII-4

Cyclone « Monique » vu par le satellite Essa 2 (1 500 km d'altitude) au large de la Réunion (*Météorologie nationale*)

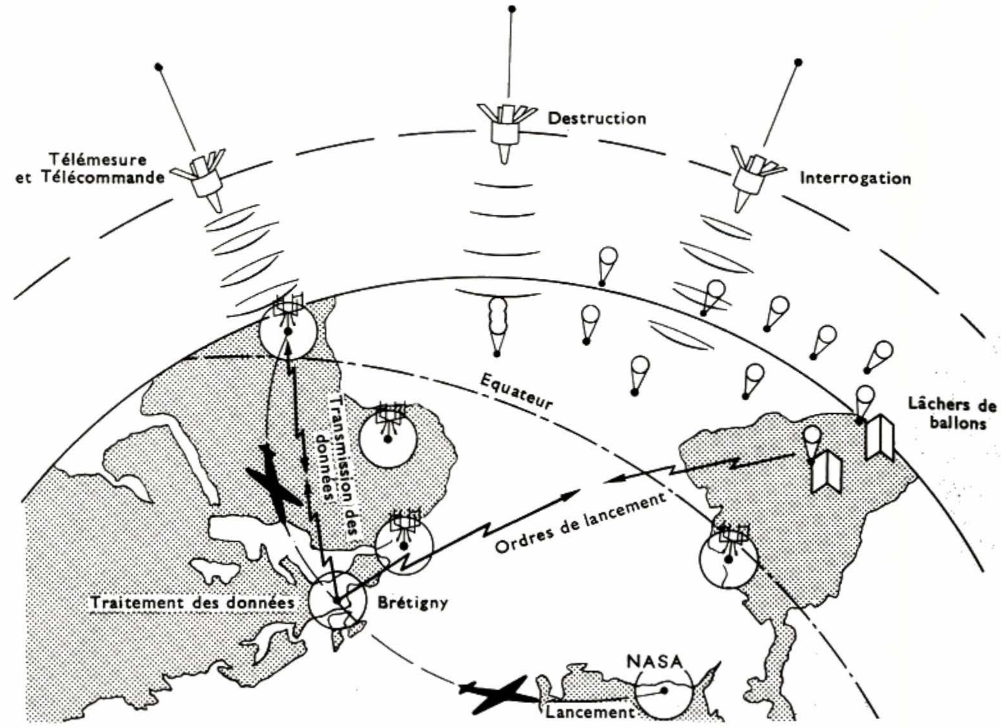


Fig. XVIII-5
Programme Éole

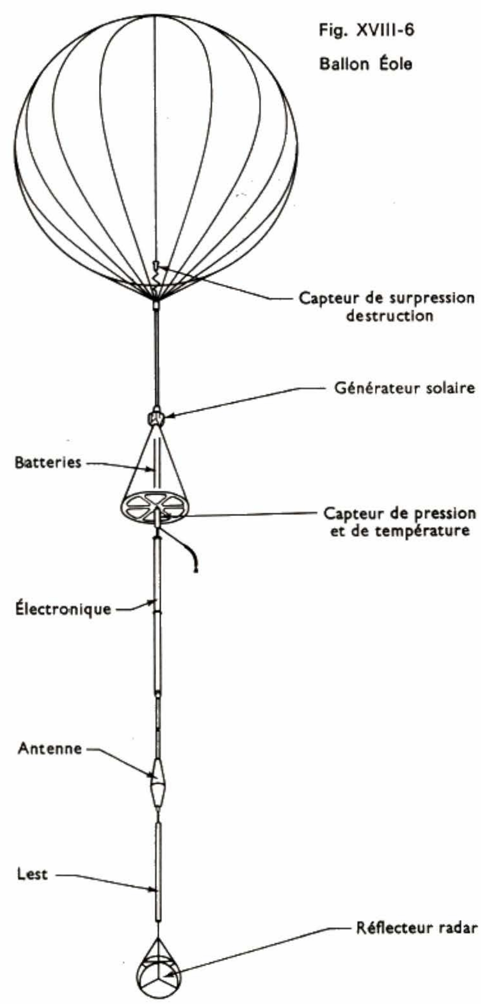


Fig. XVIII-6
Ballon Éole

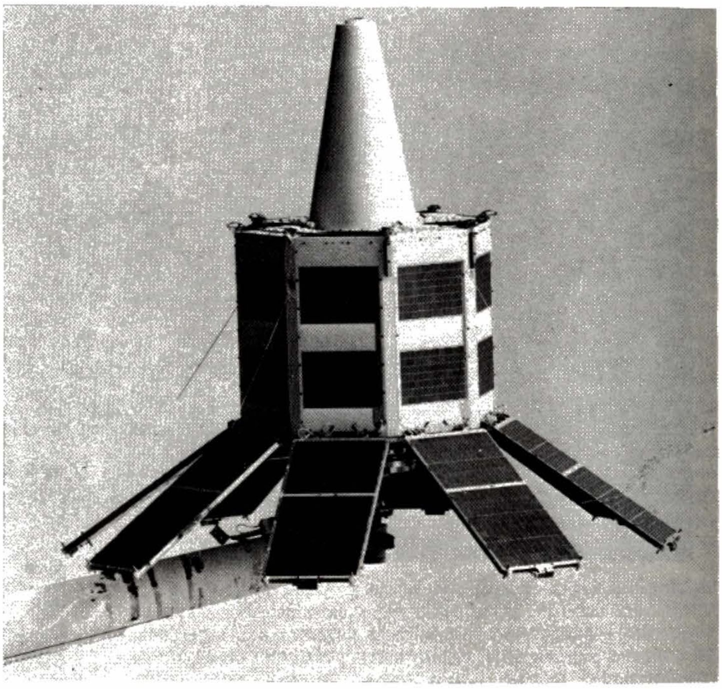


Fig. XVIII-7
Satellite
Éole
(*C.N.E.S.*)

Les données météorologiques spatiales ont aussi permis de prévoir, très longtemps à l'avance, l'arrivée d'une vague exceptionnelle de froid sur l'Europe au cours de l'hiver 1962-1963.

Dans le cadre des applications météorologiques des satellites nous citerons aussi l'expérience Éole réalisée par le Centre national d'études spatiales. Le programme Éole est à la limite de la recherche fondamentale et d'une application à la météorologie puisqu'il s'agit d'une collecte de données et de localisation dont il a été fait un usage météorologique (fig. XVIII-5, XVIII-6 et XVIII-7). Ce satellite français à défilement fut mis en orbite à 900 km d'altitude (en août 1971), il était utilisé en liaison avec 479 ballons-sondes

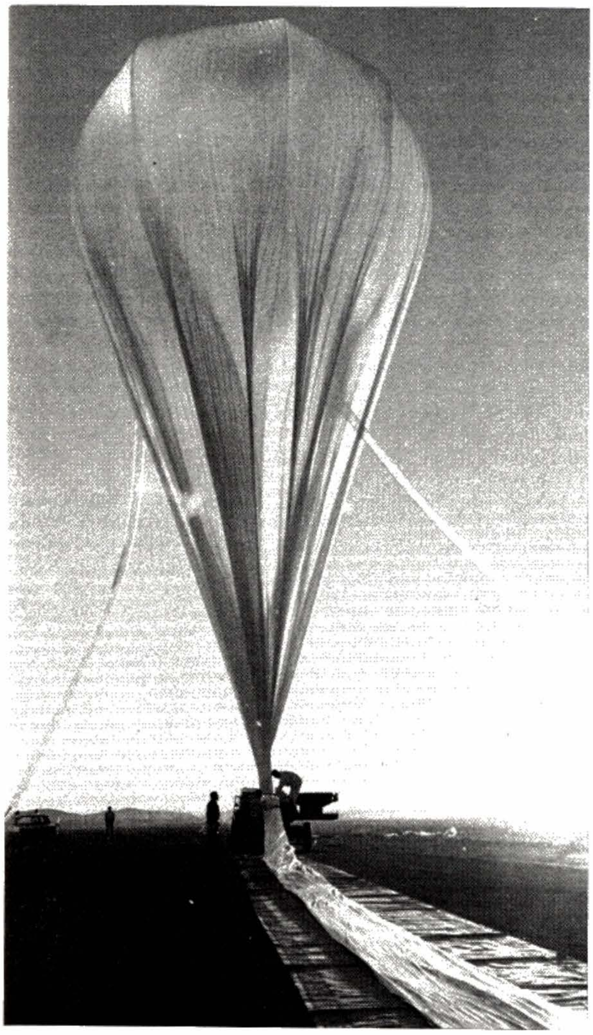


Fig. XVIII-8 — Lancement d'un ballon-sonde (d'un programme australien) Le gonflage a nécessité 1,3 millions de mètres cubes d'hélium (*Geoff Fisher-CANS*)

(fig. XVIII-8) pressurisés, à plafond constant et de longue durée, matérialisant le déplacement des masses d'air à la manière d'une traînée de fumée et servant à observer l'évolution générale de la troposphère. Le satellite avait pour fonction :

— de localiser ces ballons-sondes (lâchés en République Argentine au mois de juin de la même année),

— de stocker dans une mémoire les données fournies par les répondeurs de ces ballons.

— de transmettre ces données à chaque passage au-dessous d'une station terrienne reliée à un centre de calcul. Des mises à jour périodiques, relatives notamment à une carte des vents, étaient réalisées par ce moyen.

3. L'APPORT SPATIAL À LA NAVIGATION

3.1. L'aide à la navigation maritime. — Le péril en mer qui revêt tant d'aspects a reçu des auteurs de programmes spatiaux une attention particulière. De multiples expériences sont intégrées aux missions des satellites en vue d'apporter un soutien technique à la marine dans toutes ses branches d'activité.

L'équipage ne savait autrefois localiser son bâtiment que grâce à des instruments faisant appel à des effets magnétiques, au calcul de la position des astres par rapport à lui, ou bien au guidage radiophonique. Toutefois, des phénomènes atmosphériques ou géologiques pouvaient perturber la précision indispensable.

En 1969, une expérience fut tentée en utilisant un satellite : le navire océanographique Vema de l'université Columbia de New York croisant dans l'Atlantique Nord, recevait d'un véhicule spatial toutes les données définissant sa position avec repérage décamétrique, de jour comme de nuit, vingt fois en vingt-quatre heures. Ainsi, avec cette seule aide, il pouvait effectuer un retour au point correspondant à un précédent carottage. Les signaux du satellite étaient analysés par ordinateur. De même, après avoir rempli son rôle principal, le système français Éole, en disponibilité (satellite et ballons) a localisé le Trimaran Pen Duick IV, barré par Alain Colas pendant la course transatlantique de 1972, et cela à cinquante-deux reprises (pendant vingt jours) ; en outre, il a régulièrement donné la position de bouées dérivantes en haute mer dans le Pacifique Nord, au profit du Laboratoire de météorologie dynamique et du C.N.E.X.O., ainsi que la position d'un iceberg de Terre Adélie (expérience proposée par les Expéditions polaires françaises). Quant au satellite américain Nimbus III, il a repéré des bancs de poisson et donné la température de l'océan grâce à ses capteurs de rayonnements infrarouges. Le projet Dioscures du Centre national d'études spatiales, prévoit pour 1978 un satellite de localisation (Geole) d'une précision de 1 m à 10 m pour les objectifs fixes et de quelques centaines de mètres pour les objectifs mobiles. Les programmes futurs des techniciens de l'espace devraient permettre une précision plus grande encore, indispensable à la marine.

3.2. L'aide à la navigation aérienne. — La multiplication des vols, leur fréquence, la diversité des caractéristiques d'appareils et la qualification des pilotes et des navigateurs réclament une automation sans cesse accrue en vue de remplacer la décision humaine par celle d'instruments. La circulation aérienne, quelle que soit la participation des équipages et des contrôleurs au sol, est très exigeante en informations : la Météorologie nationale française fournit à l'aéronautique une moyenne de 10 000 renseignements par jour. De plus, la simultanéité des vols provoque de nombreuses exigences de sécurité.

Les règles internationales stipulent que l'écart entre deux appareils doit être latéralement de 220 km, de 600 m en altitude et que l'intervalle entre les vols doit être égal à 15 minutes. Les techniciens s'accordent à penser que, pour décupler le trafic, au moins deux de ces paramètres pourront être réduits (écart latéral ramené à 54 km et intervalle entre vols réduit à 5 minutes). Si la politique d'augmentation de la vitesse se poursuit, ce qui se traduira par une rotation plus accélérée d'un même appareil et par une diminution de la flotte aérienne marchande, les règles de prudence seront plus affinées. Dans tous les cas, la navigation aérienne connaîtra des exigences de sécurité croissantes et quelles que soient les facilités offertes pour négliger les phénomènes atmosphériques (par des décollages et des atterrissages sans visibilité, par des vols à haute altitude, au-dessus des perturbations qui affectent notre atmosphère), la localisation demeurera un problème crucial.

Les différentes instances internationales, Organisation de l'aviation civile internationale, d'une part, Organisation européenne de recherches spatiales, d'autre part, et différents pays tels que les États-Unis d'Amérique, la France, développent dans ce sens des projets de satellites aéronautiques. Le programme Dioscures, conjointement présenté par le Centre national d'études spatiales et le Secrétariat général à l'aviation civile (programme opérationnel en 1978), vise à établir la localisation au moyen de quatre points : une station terrienne, deux satellites et l'avion lui-même. La station terrienne émet un signal spécial préaffecté à l'appareil, ce dernier étant tenu lui-même pour un signal. Les deux satellites reçoivent le signal émis par la Terre ; le temps de transmission entre l'avion et les deux satellites détermine la position exacte du premier. L'expérience intégrée au programme américain ATS prévoit un système fonctionnant en 1977 ; il permettrait de situer exactement, de cinq minutes en cinq minutes, deux cents avions en vol.

La localisation, indispensable à l'aéronautique, est une technique très avancée. Dès 1970, grâce au satellite Nimbus III, elle permettait le repérage d'un élan femelle porteur d'un collier émetteur qui se déplaçait en liberté dans une vaste réserve canadienne. Le microrepérage décamétrique deviendra métrique et, un jour, centimétrique.

4. LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE AU PROFIT DES RESSOURCES TERRESTRES

Notre planète offre à exploiter la végétation, la faune, des richesses aquatiques ou minérales (charbon, pétrole) et l'atmosphère. Des exploitations intensives, en un même lieu, ont fait prendre conscience des limites de ce capital et rechercher d'autres gîtes et des techniques nouvelles de découverte. Puis est apparu le préambule d'une organisation de l'usage de ces ressources. On s'aperçut alors que les procédés de localisation manquaient d'efficacité faute de disposer de moyens d'investigation. La découverte de la thermographie (on utilise la propriété de réflexion des objets ensoleillés et leur réflexion propre indépendante de l'ensoleillement), celle de la sismographie, bien antérieure, ont apporté un progrès considérable dans ce domaine. Cependant les dimensions de notre planète et son occupation très inégale par l'homme empêchaient d'avoir une connaissance d'ensemble. L'utilisation de l'aérostation puis de l'aéronautique et de la navigation spatiale, a permis d'améliorer notablement notre connaissance des sols et même de celle des sous-sols. À travers des cultures, le navigateur aérien apprit à distinguer le témoignage d'anciens établissements humains, les vestiges de fondations d'habitat. Il put surtout observer sur de grandes superficies la mosaïque des végétations et plus il s'élevait, plus son champ de vision augmentait; il découvrait des mouvements de terrain qu'aucune exploration pédestre n'avait permis de déceler malgré l'instrumentation cartographique (cas de mouvements de terrain de grande étendue et de faible altitude). La preuve de l'utilité de ce survol à des altitudes toujours plus grandes a été fournie notamment par le satellite américain Nimbus I qui, à 800 km d'altitude, a pris la première photographie globale du territoire français avec une netteté parfaite (fig. XVIII-9). Une autre démonstration est due au satellite ATS-3 qui a décelé qu'un nuage de poussière en suspension au-dessus de l'île de la Barbade dans les Petites Antilles, avait pour origine le Sahara.

4.1. Technique de la télédétection spatiale. — La télédétection des ressources terrestres, quelle que soit l'altitude à laquelle elle est effectuée, se présente comme une chaîne qui comprend selon L. Ladet, attaché au Centre spatial de Brétigny:

— La zone considérée émettant un rayonnement.

— Le milieu de propagation de ce rayonnement.

— Une plate-forme d'observation: avion, ballon stratosphérique, satellite.

— Des capteurs embarqués « travaillant » dans différents domaines du spectre électromagnétique.

— Un sytème d'enregistrement ou de transmission des données.

— Un centre de recueil des données et de prétraitement.

— Un centre de traitement ou d'interprétation qui détermine la corrélation entre le rayonnement mesuré et la nature du sol observé puis, par voie de conséquence, un catalogue de correspondance des signes relatifs à la nature des terrains observés (on dit aussi un catalogue de « signatures »).

Aucune télédétection de sols en surface ne saurait être valable non seulement si elle n'est précédée d'une étude de la zone qui va faire l'objet de télédétection, mais encore d'une étude de cette zone à l'instant de la télédétection. Il ne faut pas oublier que l'aspect de la nature est mouvant et que l'intensité du rayonnement varie avec les divers moments de la journée, les paramètres sont innombrables et les colorations, résultant de la télédétection par l'observation à travers l'infrarouge, nécessitent une connaissance des modifications dues à la latitude et au calendrier. Par exemple, le rayonnement sous-marin de poissons est différent de celui des submersibles (un catalogue détaillé doit donc être dressé avec une extrême prudence). Par ailleurs, les époques de culture dans une contrée telle que la France ne sont pas les mêmes exactement au sud et au nord et les investigations spatiales menées au-dessus de champs de luzerne ou de betteraves ne conduisent pas forcément aux mêmes résultats s'il s'agit de cultures dans un pays d'Amérique ou dans un pays européen. Le sol américain et le sol soviétique sont demeurés vierges jusqu'à une époque récente, ceux de la France et de l'Italie ont été retournés, souvent depuis plusieurs siècles: leur rayonnement et leur émissivité n'ont pas les mêmes caractéristiques. Le R.P. Poidebard, pionnier de la télédétection archéologique, avait déjà remarqué que l'observation des colorations de certaines plantes d'un champ recouvrant d'anciennes fortifications, invisibles du sol, apparaissaient seulement à certaines heures de la journée.

4.2. Intérêt de la télédétection. — Les Journées d'études de la télédétection des ressources naturelles organisées en 1971 par le Centre national d'études spatiales ont démontré que la plupart des activités relatives au sol, au sous-sol, aux rivières et à la mer, sont intéressées par cette investigation à distance: océanographie, pêche, agronomie, phytobiologie, écologie, production agricole, recherche géologique et minière (notamment des hydrocarbures), pétrographie, production d'énergie, hydrologie, aménagement du territoire, géographie appliquée, ponts et chaussées.

Les applications ne se comptent plus: détermination de la pollution de l'eau par « visualisation » des masses d'eau, étude de conditions d'assolement ou de reprise de végétation après incendie, cartographie de la végétation, visualisation avec un rayonnement infrarouge thermique de particularités géologiques situées en dessous de la surface terrestre (grottes, affleurements rocheux recouverts de sol végétal). Par rapport à un « modèle » de coloration obtenue en infrarouge, les variations chromatiques permettent de déceler les affections dont les plantes sont atteintes (à la condition que le « modèle » soit local et non universel, et ait été préétabli).

L'exemple le plus spectaculaire de l'avantage présenté par la télédétection spatiale a été celui de la seconde prospection d'un territoire africain supposé pétrolifère. La première prospection effectuée au sol, avec les moyens classiques, dont la percussion, avait amené à la conclusion que la superficie du gisement était trop exiguë pour présenter une rentabilité suffisante. L'autre, effectuée par un satellite, révéla que l'un des méandres de la première poche d'hydrocarbure, jugée insignifiante, conduisait en réalité à une masse considérable de ce combustible fossile. L'alimentation elle même bénéficie des investigations par satellites; le Dr Dickson, du *Fischeries Laboratory* à Lowestoff, en Grande-Bretagne, a fait progresser la recherche sur les ressources en poissons de la mer du Nord et de l'océan Atlantique par la cartographie dynamique du déplacement des œufs et des larves de certains poissons à partir de la télédétection spatiale des courants marins de grande profondeur. Par ailleurs, un satellite est parvenu à fixer les dimensions exactes du Rift, ce grand fossé naturel partiellement connu qui, sur 30 km de large et 300 à 500 km de longueur, s'étend de Suez au Tanganyika.

5. LA SURVEILLANCE MILITAIRE À TRÈS HAUTE ALTITUDE

L'affectation de satellites à la surveillance militaire constitue désormais une nouvelle arme qui a la possibilité d'être utilisée en temps de paix comme mesure de dissuasion. Il faut ajouter que si rien n'est invulnérable, on doit admettre cependant que la vitesse et la mobilité des satellites, ainsi que leur altitude, les prémunissent mieux que les avions de la poursuite de l'adversaire.

L'existence de ces satellites spécialisés est avouée mais le secret militaire les entoure et on n'a connaissance de leurs caractéristiques que lorsque ceux-ci sont périmés.

Un satellite militaire de surveillance est, par principe, à défilement, c'est-à-dire qu'il tourne à une vitesse supérieure à celle de notre planète. Au passage à la verticale du territoire considéré, il prend des vues photographiques ou des images de télévision. Dans le premier cas, les clichés sont stockés non développés dans une « boîte noire » qui est automatiquement larguée lors du passage du satellite au-dessus de la nation propriétaire. Un parachute freine son retour dans l'atmosphère et la récupération se fait soit sur la mer soit en vol. L'émission des vues de télévision se fait par l'intermédiaire de signaux codés qui sont décryptés

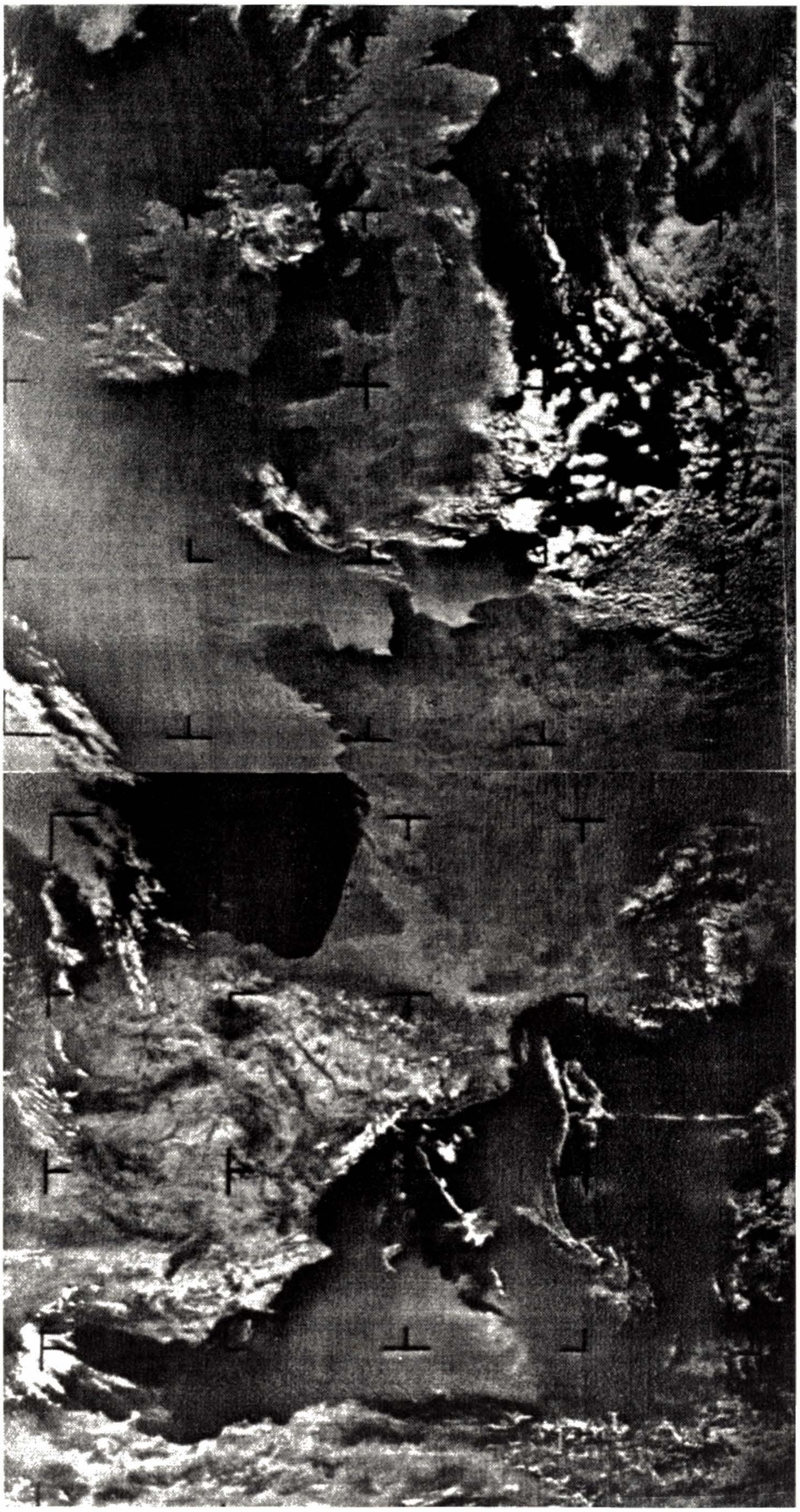


Fig. XVIII-9

Image de la France reçue à Lannion et transmise par Nimbus I (800 km d'altitude) (*Météorologie nationale*)

à la réception ; ce procédé bénéficie des derniers perfectionnements des télécommunications.

Toutes les techniques employées en télédétection des ressources terrestres (parfois dénommée surveillance terrestre, par analogie) servent aux satellites militaires et l'interprétation de leur prises de vues est identique à celle en usage dans les autres utilisations spatiales. La détection aéroportée des camouflages, antérieure à l'ère spatiale, y est perfectionnée mais le principal acquit est la localisation des ouvrages en sous-sol ou des aménagements dans des grottes et des souterrains, cela grâce à l'utilisation de rayonnements infrarouges. Les laboratoires photographiques militaires utilisent également les procédés d'affinement des clichés qui font apparaître des détails que l'optique a enregistré en potentiel mais qui n'apparaissent pas à l'œil nu sur les clichés.

Comme dans toutes les autres utilisations de l'observation spatiale, la prudence est de rigueur car des confusions peuvent se produire lorsque le catalogue des « illusions optiques » n'est pas établi. Ainsi, au cours d'une mission du programme Mercury, l'astronaute américain Gordon Cooper informa par radio qu'il apercevait des camions sur une route limitrophe de la frontière américano-mexicaine et dans la même région, un ensemble de cheminées d'usine. Des recherches immédiatement entreprises sur le terrain, avec confrontation des photographies prises de l'espace, permirent de constater qu'il n'y avait pas eu une illusion d'optique formelle de la part du navigateur spatial, mais seulement interprétation trop sommaire : il avait confondu la poussière soulevée par les camions (cachés momentanément) et les cheminées avec leurs fumées.

La connaissance des lois du rayonnement permet, à partir de l'espace, de reconnaître un convoi militaire à l'arrêt ou en marche si les véhicules sont dotés de moteur à essence (autrement dit s'ils émettent des gaz d'échappement ou non). La détection d'un sous-marin en plongée est obtenue en constatant le rayonnement de sa masse à travers l'eau. En 1955, un satellite a détecté des colonnes de troupes américaines en déplacement, participant à une manœuvre (*Sagebrush*), et a permis l'« anéantissement théorique » de la plupart d'entre elles.

La surveillance spatiale s'est exercée avec autant d'efficacité sur des bases de lancements de missiles et des bases nucléaires. Cette surveillance, soigneusement organisée par les nations possédant des satellites, se traduit par une documentation qui étaye désormais l'argumentation des diplomates, et, dans une certaine mesure, désamorce des risques de conflit. Les gouvernements des puissances les plus fortunées considèrent ce mode d'investigation comme capital puisqu'ils consacrent des sommes considérables aux applications militaires dans les budgets relatifs à l'espace (sans doute quarante pour cent).

CHAPITRE XIX

VOL SPATIAL CIRCUMTERRESTRE ET PLANÉTAIRE

1. POURQUOI LA CONQUÊTE DE L'ESPACE

Compte tenu des dépenses considérables entraînées par la conquête de l'espace, il n'est pas inutile d'essayer de montrer qu'il ne s'agit pas uniquement de satisfaire la curiosité de certains, quoique ce soit un mobile inhérent à la nature humaine d'essayer d'explorer l'inconnu. Il y a des motifs, qui, bien qu'encore mal perçus, prendront certainement de plus en plus de valeur dans l'avenir.

Tout d'abord il est bien certain qu'au cours de ces dernières années la conquête de l'espace a pris l'allure de performance de prestige. Il n'est pas besoin d'être grand clerc pour comprendre que la course à la Lune, par exemple, avait une portée politique, c'est-à-dire que l'on ne pouvait éviter que les populations ne fassent une comparaison entre la valeur des progrès techniques dans des pays ayant des régimes politiques différents et n'en tirent toutes sortes de conclusions.

Cependant, indépendamment de ces considérations provisoires et des connaissances acquises sur notre monde, il est un aspect économique immédiat. En première approche on peut considérer l'objectif de déposer des êtres humains sur la Lune comme un problème, ou plutôt comme un ensemble de problèmes à résoudre par les chercheurs et les techniciens de diverses disciplines. La recherche des solutions est nécessairement une source de progrès techniques considérables. Même si l'objectif prévu n'est pas atteint, les divers perfectionnements réalisés, les diverses techniques nouvelles mises au point, ont des applications immédiates notamment pour l'amélioration des performances d'objets d'usage courant (appareillage ménager, téléphone, télévision, etc.) ou de matériaux (utilisation sur les avions notamment).

Il existe aussi des objectifs relatifs à l'amélioration de la vie, voire à la survie de l'humanité qui, à eux seuls, peuvent justifier les efforts entrepris. Grâce à un réseau de satellites conjugué avec une ou plusieurs stations orbitales, dont il sera parlé plus loin, il est possible :

— de procéder à l'étude de l'évolution et à la surveillance des récoltes terrestres. Au moment où certains annoncent que la population terrestre dépassera six milliards d'individus au début du prochain siècle, c'est une tâche d'intérêt primordial, qui ne peut être exécutée correctement qu'avec des observateurs spatiaux ;

— de rechercher de nouveaux gisements de pétrole, de minerais de charbon et de matières premières ;

— de surveiller et de prévoir l'évolution du temps, la formation des cyclones, les éruptions volcaniques, les incendies de forêts, le déplacement des icebergs, etc. ;

— d'améliorer considérablement les communications et d'éviter la saturation, qu'il s'agisse de téléphonie, de navigation aéronautique ou maritime ;

— d'assurer une surveillance militaire plus précise, et c'est peut-être l'un des plus importants bénéfices que l'humanité en tirera car devant la difficulté croissante d'assurer le secret des armements, l'obstacle à la paix d'un désarmement freiné par la méfiance d'adversaires puissants sera peut-être surmonté.

En résumé, l'atterrissage des hommes sur la Lune n'est pas une fin en soi ; c'est plutôt une étape qui permet, grâce à la fiabilité acquise, de ne plus considérer comme utopiques d'autres objectifs plus lointains.

2. LA STATION SPATIALE

L'idée de la station spatiale relève tout autant d'un désir d'efficacité que d'une nécessité d'économie. À l'origine, les instruments embarqués dans des engins spatiaux et, à peu de choses près, les astronautes ont travaillé selon un programme strictement établi à Terre auquel ils ne pouvaient apporter de modifications notoires, en raison de la durée trop limitée des vols. Cette durée est le dernier volet du triptyque spatial, le premier étant l'insertion dans l'espace et le second, le travail dans l'espace y compris l'atterrissage sur la Lune. Les circuits spatiaux ont une portée forcément limitée et leurs prix sont prohibitifs, compte tenu des résultats ramenés à Terre, quoique les progrès de la connaissance aient fait un bond considérable depuis que l'homme a pu lancer dans l'espace les engins de sa fabrication. En un mot, l'investigation spatiale a présenté à ses débuts un déroulement mécanique qui faisait inévitablement trop abstraction des facultés d'adaption, de libre arbitre et de l'intelligence des hommes. Un des buts de la recherche spatiale a donc été de porter dans l'espace un engin qui serait un laboratoire, le plus polyvalent possible servi par des spécialistes appartenant à diverses disciplines et capables de déterminer, eux-mêmes, leur activité spatiale dans le cadre d'un plan général.

Les premières cabines spatiales, si vastes qu'elles aient été, n'ont jamais dépassé les dimensions d'un logement assez réduit. Les dimensions optimales du vaisseau-laboratoire excédant les capacités de lancement à partir de la Terre, aussi a-t-il fallu concevoir des projections successives d'éléments à réunir dans l'espace. Les premiers rendez-vous spatiaux, les sorties des cosmonautes (soviétiques) et des astronautes (américains) devenus piétons de l'espace, les arrimages de cabines entre elles ont démontré la possibilité d'un tel assemblage spatial. Les différentes parties pourraient être amenées par une navette spatiale remorquée par un engin spécial et effectuant un va-et-vient Terre-Satellite (V. chap. 10).

Cette opération, à première vue hardie, ne consiste qu'en une application poussée des possibilités connues du comportement des satellites artificiels, une fois qu'ils ne sont plus soumis à l'attraction terrestre.

La course à l'espace, par satellites temporaires et récupérables, dotée de moyens inédits, s'est vite révélée comme devant dépasser les possibilités financières d'un seul État.

La compétition titanesque, au moyen de missions fragmentaires d'innovation, ayant pris fin (compte non tenu des missions de surveillance militaire), Washington et Moscou ont entrepris d'inaugurer des missions bipartites, où les frais seraient partagés. D'ailleurs la logique conduirait impérativement à internationaliser la recherche spatiale; l'internationalisation des télécommunications par l'espace, la répartition des données recueillies entre les unités scientifiques du monde entier, le don des échantillons lunaires, tout concourrait à donner un caractère international à la recherche hors de l'atmosphère.

3. LE PROGRAMME POST-APOLLO

L'idée du projet post-Apollo a été facilitée par plusieurs résultats techniques soviétiques et américains: Voskhod-I, premier vaisseau spatial multiplace, Voskhod-II, première sortie d'un cosmonaute dans le vide, Gemini-VI, rendez-vous spatial et vol groupé, Gemini-VIII, premier arrimage de deux vaisseaux spatiaux. Mais ce programme post-Apollo, dont il est prévu qu'il sera opérationnel vers la décennie 80, est en mutation constante depuis sa première définition. Le souhait américain aurait été de faire partager aux instances spatiales de l'Europe occidentale, laquelle constitue la plus forte entité spatiale après les États-Unis d'Amérique et l'U.R.S.S., une partie des frais occasionnés par le programme. L'achoppement est venu d'une rentabilité industrielle apparue insuffisante à cette Europe de l'Ouest. En réalité, les pays du Vieux Monde concernés éprouvaient une crise de conscience. Devenus technologiquement majeurs malgré de nombreuses lacunes, ils avaient plus ou moins explicitement le désir d'œuvrer individuellement ou, tout au moins, dans le cadre de l'Europe. En outre, aux yeux de beaucoup, la collecte des expériences à faire exécuter dans une station spatiale n'était pas suffisamment organisée. La technique de la navigation spatiale paraissait en avance sur la capacité de la science. Tout cela se traduisait par de longues discussions, menées à l'échelon ministériel, préjudiciables au projet lui-même.

Cependant, petit à petit, s'est dégagé un dénominateur commun; la station spatiale, quelle que soit son orbite, circumterrestre ou circumlunaire, doit comporter un logement, un laboratoire, un observatoire, un atelier et un ou plusieurs véhicules de sortie (à l'image des LM). Un équipage d'au minimum une douzaine d'hommes doit l'habiter et être périodiquement relevé.

Les dimensions considérables de cet ensemble et sa masse énorme excluent un envoi direct de la Terre. Petit à petit a donc été conçu un assemblage des divers éléments dans l'espace même, par des assembleurs, piétons de l'espace, travaillant dans le vide. Le lancer des éléments, pratiquement possible, a été abandonné pour des raisons d'économie et a été remplacé par leur charroi au moyen d'une navette.

Différents modèles de stations ont été étudiés dans les bureaux d'études des nations ayant rang spatial. Toutefois, l'engin opérationnel sera sans doute composite. Il sera également expérimental en lui-même car, en ce domaine, la routine, la série sont exclues pour de longues années. La maîtrise de l'espace étant encore aléatoire, il est évident que des mesures de sécurité très sévères seront prises; l'ensemble se trouve alourdi au détriment de l'instrumentation embarquée.

Un des avantages déterminant de la station sera l'aptitude de ses servants à procéder aux réparations éventuelles, voire à la réalisation d'un outillage scientifique opportun.

L'initiative dont sera investi l'équipage soulève un grave problème: celui de l'exploitation des données recueillies par les unités scientifiques concernées qui demeureront à Terre. Le séjour dans l'espace est en effet trop onéreux pour qu'il soit imaginable de confier cette exploitation à l'équipage lui-même. Celui-ci devra pouvoir, presque sur-le-champ, bénéficier du concours de la Terre, notamment d'ordinateurs. Cela implique une gigantesque infrastructure sur notre planète, avec des liaisons parfaites, le tout coordonné par un vaste état-major. En effet, un véhicule habité d'aller et retour exige déjà une quantité vertigineuse de moyens à Terre; de plus, dans ce cas, l'exploitation des données obtenues dans l'espace peut s'étaler sur plusieurs mois, voire plusieurs années. À Terre, il faudra que soit affecté, en permanence, un personnel qualifié et travaillant à grande vitesse.

En compensation, le bénéfice scientifique attendu est incommensurable. Dans la mesure où il ne sera pas imputé de mission trop étroite à la station, celle-ci aura une souplesse et une liberté d'études inconnues jusqu'alors. Par ailleurs, la station pourra à la demande de la Terre se livrer à des investigations et des vérifications non programmées. Une partie de la science et même la philosophie de celle-ci s'écrira dans l'espace.

Le principe d'une station orbitale une fois admis (station conçue pour une durée de vie très grande) il est nécessaire de mettre au point une navette spatiale pour assurer les liaisons Terre-station et un véhicule, basé dans l'espace, qualifié de remorqueur spatial. En fait, il assurera un rôle de module de service spatial, chargé d'assurer à partir de la station, les transferts d'orbite, la mise en place, la surveillance et l'entretien des satellites; il pourra être utilisé pour le ravitaillement des véhicules d'exploration lointaine mais aussi éventuellement pour des sauvetages de l'espace. Avec ce système station-remorqueur-navette on évitera la perte, donc le renouvellement des engins et l'on débouchera dans la véritable économie spatiale. L'homme n'aura plus à engager des dépenses considérables pour des fractions de missions. Il habitera l'espace, la science demeurera dans l'espace pendant des années. De nouvelles connaissances technologiques et industrielles, seront certainement obtenues grâce à ces stations et aux navettes, qui apporteront régulièrement à Terre les résultats acquis dans l'espace.

4. LA NAVIGATION INTERPLANÉTAIRE

Il y a seulement une vingtaine d'années, le vol interplanétaire habité n'était encore qu'un produit de l'imagination en raison de toutes les inconnues que rencontrait un tel vol, principalement relatives au comportement du corps humain en état d'apesanteur prolongé, dans un milieu soumis à de multiples radiations. Les chances de survie durant le trajet et celles de retour à la Terre restaient très limitées.

De même que l'atterrissage sur la Lune n'a pu être réussi que grâce, en particulier, à l'utilisation d'ordinateurs dont la conception remonte à plusieurs dizaines d'années (ils ont permis des corrections de trajectoires presque instantanées) et au progrès des télécommunications à longue distance, de même la possibilité de vols interplanétaires sort du domaine du rêve depuis que l'on a des éléments de réponse ne serait-ce que suite à l'expérience Skylab (durée de séjour en apesanteur, possibilités de réparations, etc.). Aussi peut-on dès maintenant, sans faire de science-fiction, indiquer très succinctement les projets actuellement envisagés.

4.1. Missions inhabitées. — Le programme de recherches interplanétaires comprend, en première phase une série de missions inhabitées durant la décennie prochaine avec comme phase finale de ce programme, le débarquement de l'homme sur la planète Mars entre les années 1985 et 2000.

Les missions inhabitées prévues sont, successivement,

— d'ici à 1975, lancement vers Mars d'un véhicule d'observation par Atlas-Centaur, pour passage à proximité de Vénus (à 5 500 km) suivi d'un survol de Mercure à environ 1 000 km.

Ce véhicule aurait une masse utile de 400 kg, dont 50 kg d'appareillage scientifique.

— entre 1975 et 1980, missions dite Viking, vers Mars également, consistant dans le lancement de deux spationefs comprenant deux véhicules (un véhicule orbital et un véhicule d'atterrissage en douceur) par des Titan-Centaur.

Après une période de navigation sur orbites martiennes (33 000 km-1 000 km, d'une durée de révolution de 24 heures), au cours de laquelle seront observés les sites martiens, l'élément d'atterrissage et l'élément orbital seront séparés. Au cours de la descente, l'élément d'atterrissage

recueillera des données sur la composition de l'atmosphère martienne. Arrivé à terme, il procédera à un certain nombre d'expérimentations. Quant à l'élément orbital, il servirait, en particulier, de relais de télécommunications entre le module d'atterrissage et la Terre.

— Presque simultanément, entre les années 1977 et 1990, se dérouleraient des missions d'un ensemble dit « Grand Tour » consistant dans l'exploration, plus ou moins totale, des planètes lointaines, en utilisant, pour assurer les trajectoires, l'apport des champs de gravitation successivement rencontrés aux fins d'accélération ou de décélération du spationef. À noter que, pour ces missions, la période 1976-1980 sera des plus favorables car elle correspondra à une situation spatiale des planètes lointaines d'un caractère exceptionnel, puisqu'elle sera la meilleure depuis 170 ans.

Il est prévu, vers 1977, le lancement d'un ou deux spationefs qui pourraient atteindre Pluton vers 1986, après être passé au voisinage de Jupiter et de Saturne; il est aussi envisagé, vers 1980, un ou deux spationefs pour l'étude de Jupiter, Uranus et Neptune.

4.2. Missions habitées - Débarquement de l'homme sur Mars. — Vers 1985-1990 est envisagé le départ de douze hommes répartis à bord de deux véhicules, prévus pour s'arrimer, par la suite, en un véhicule unique. La mise en orbite martienne, aurait lieu après une durée de vol de douze mois ; le « Module d'exploration martienne » serait ensuite détaché avec trois ou quatre hommes à bord ; il atterrirait sur la planète.

Après un séjour d'un mois, l'équipage reviendrait vers le véhicule orbital, puis vers la Terre, via Vénus, afin d'assurer le freinage du véhicule et de permettre certaines observations scientifiques, avant le retour en orbite terrestre qui aurait lieu 21 mois après le départ.

La réalisation d'une telle mission suppose, ainsi qu'il a déjà été évoqué, d'avoir recueilli des assurances suffisantes,

— sur les moyens de surmonter les dangers de l'environnement,

— sur les possibilités de vie d'un équipage durant 21 mois dans les conditions d'une telle exploration,

— sur la fiabilité des matériaux et des instruments, principalement ceux concernant la navigation,

— sur la maîtrise d'une propulsion nucléaire, type Nerva, qui devrait être au point vers 1976.

Cette mission nécessite aussi de pouvoir disposer d'un ensemble base spatiale-navette et remorqueurs spatiaux parfaitement opérationnels.

LES AÉROGLISSEURS

LES AÉROGLISSEURS NON GUIDÉS

INTRODUCTION

Avant d'aborder le domaine des véhicules à effet de sol ou aéroglisseurs, il est nécessaire d'en donner une définition et de les classer en différentes catégories selon les techniques utilisées (que celles-ci soient déjà confirmées ou en voie de développement), techniques dont procèdent leur conception et leurs conditions d'emploi. Le choix des termes employés se précisera au fur et à mesure de la lecture des chapitres successifs.

1. DÉFINITION. CLASSIFICATION

Actuellement, la définition adoptée par la plupart des spécialistes est la suivante :

Un aéroglisseur est un véhicule de surface dont la masse, lorsque l'appareil est en marche de croisière, est sustentée, entièrement ou en majeure partie, par une répartition de pression d'air atmosphérique conditionnée par la présence de la surface au-dessus de laquelle il évolue.

Cette définition ne tient pas compte de la nature du support au-dessus duquel l'aéroglisseur évolue ; il y a donc lieu de distinguer les aéroglisseurs marins et les aéroglisseurs terrestres.

1.1. Diverses catégories d'aéroglisseurs marins

— Les aéroglisseurs marins amphibies qui évoluent sur l'eau et sur la terre (SRN 4 de la *British Hovercraft Corporation* de 170 t, Naviplane N-300 de la S.E.D.A.M. de 30 t, Navijet NJ-70, en projet, de 0,7 à 6 t ; procédés A. Grihangne).

— Les aéroglisseurs marins non amphibies qui n'évoluent que sur l'eau (Hovermarine HM 2 de 20 t, Surface Effect Ship de *Bell Aerospace Corporation* et d'Aérojet Gal. projeté à 4 000 t).

— Les aéroglisseurs marins semi-amphibies qui n'évoluent que sur l'eau mais qui peuvent s'échouer pour le chargement et le déchargement de leur cargaison (VT. 1 *Vosper Thornycroft* de 76 t).

Les aéroglisseurs marins peuvent être classés en fonction de la façon dont la sustentation est assurée :

— *L'aéroglisseur à sustentation aérostatique* (A.S.A.S.) est un aéroglisseur supporté indépendamment de sa vitesse, par un coussin d'air qui se déplace avec lui.

Dans le cas des aéroglisseurs à jupes souples (A.J.S.) le confinement du coussin d'air est réalisé en totalité par des parois souples. Si les cloisons latérales du coussin d'air sont constituées par des éléments de structures rigides, l'aéroglisseur est dit à quilles latérales (A.Q.L.).

— *L'aéroglisseur à sustentation aérodynamique* (A.S.A.D.) est un aéroglisseur supporté en marche de croisière par les forces aérodynamiques engendrées par l'écoulement de l'air autour de surfaces portantes au voisinage de la mer.

L'A.S.A.D. à effet tunnel (A.E.T.) se distingue du précédent par la présence de parois latérales qui canalisent, à l'intrados de la cellule, l'écoulement aérodynamique entre l'appareil et la mer.

L'A.S.A.D. hydravion (A.H.) est un hydravion qui vole au ras des flots pour profiter au maximum de l'effet de sol.

1.2. Les aéroglisseurs terrestres. — Les aéroglisseurs terrestres se divisent en deux catégories :

— Les aéroglisseurs terrestres *non guidés*.

— Les aéroglisseurs terrestres *guidés sur voie*.

Dans la première catégorie sont classés :

— Les *véhicules automoteurs* qui sont entièrement autonomes et se propulsent eux-mêmes (BC 7 de la S.E.D.A.M.)

— Les *plates-formes de transport* spéciales dont le déplacement, assuré par un moyen extérieur, s'effectue sur des terrains quelconques ou préparés (ACT 100 de *Arctic Engineers et Constructors*, remorques routières).

— Les *engins de manutention* qui sont utilisés pour déplacer les charges à l'intérieur d'une usine ou sur des sols préparés.

Dans la deuxième catégorie et suivant leur mode de propulsion, on distingue :

— Les aéroglisseurs guidés sur voie à *propulsion aérienne* (Aérotrain Bertin).

— Les aéroglisseurs guidés sur voie *à moteur linéaire*. (Aérotrain Bertin Suburbain, *Tracked Hovercraft Ltd*).

2. HISTORIQUE

L'idée de sustenter un véhicule par un coussin d'air ou par un film d'air pour réduire sa résistance à l'avancement remonte à deux siècles et demi. Les premières réalisations industrielles datent du début de la seconde moitié du XXe siècle. Parmi les protagonistes qui ont contribué à concrétiser cette idée, il convient de citer :

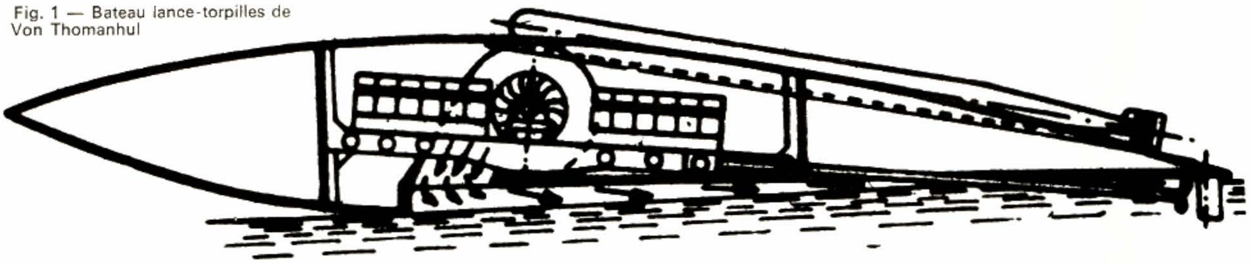
— le Suédois E. Swedenborg qui, au début du XVIIIe siècle, propose un dispositif manuel, actionnant des volets, pour forcer l'air sous une plate-forme en bois ;

— le Français L. Girard qui, en 1864, construit un modèle de véhicule sans roue se déplaçant sur des rails et qui peut être considéré comme le précurseur des aéroglisseurs guidés ;

— quelques savants ou inventeurs comme l'Anglais J. S. Russel (1865), le Hollandais B. J. Tiddeman (1875), l'Anglais J. S. Thornycroft (1877) qui suggèrent, pour réduire la traînée de frottement hydrodynamique de la coque des bateaux, de lubrifier cette dernière par un film d'air.

C'est au début du XXe siècle que l'idée prend réellement corps et que les brevets pris par les différents chercheurs

Fig. 1 — Bateau lance-torpilles de Von Thomanhul



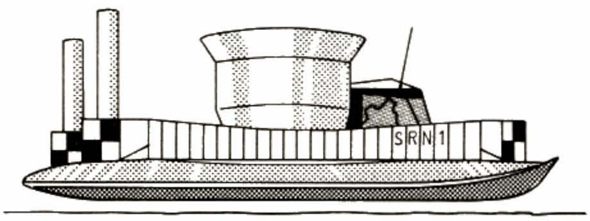


Fig. 2 — Le SRN-1

concernent plus nettement l'utilisation de l'effet de sol. Il semble que ce soit l'Anglais J.R. Porter qui ait pressenti en 1908 les possibilités de la sustentation de plates-formes par jet périphérique.

L'Australien A. V. Alcock en 1912, l'Autrichien D. Muller Von Thomanhul en 1916, le Français Gambin en 1921, l'Américain D. K. Warner en 1928 et le Finlandais T. J. Kaario en 1935, s'intéressent avec plus ou moins de succès à des modèles de véhicules sur coussin d'air. Von Thomanhul réalise un bateau lance-torpilles (fig. 1) qui atteint 40 nœuds avec 480 ch (1 ch = 736 W) de puissance installée et Kaario le premier aéroglisseur à sustentation aérodynamique.

En 1955 de Lima au Pérou et G. S. Cockerell en Angleterre montrent l'intérêt du jet périphérique pour profiter de l'effet de sol. À partir de 1957, Duthion en France, à la S.N.E.C.M.A., découvre cet effet au cours d'essais sur turboréacteurs.

Après sept années de recherches, le premier aéroglisseur amphibie SRN 1 est réalisé en 1959 par G. S. Cockerell chez Saunder-Roe. Il traverse la Manche de Calais à Douvres le 25 juillet 1959 (fig. 2).

Les premières expérimentations françaises appliquées aux aéroglisseurs terrestres n'utilisent pas les possibilités du jet périphérique et s'orientent vers le coussin multijupe (Terraplane de J. Bertin; BC 4 1962) dont le rendement de sustentation est amélioré par l'adjonction d'une jupe périphérique (BC-8 1964). Le BC 8 préfigure l'aéroglisseur amphibie N 300 en cours d'étude et de développement par la S.E.D.A.M. depuis 1966 (fig. 3 et 4).

Depuis 1964, Britanniques et Américains ont abandonné le jet périphérique au bénéfice d'une alimentation diffuse à travers un boudin souple périphérique qui augmente la hauteur de franchissement des obstacles sans requérir une puissance de sustentation excessive mais au prix du frottement des éléments souples sur le sol.

De nouveaux concepts pour assurer notamment le confinement du coussin d'air de sustentation font actuellement leur apparition en France (Multijupe annulaire; Brevets A. Grihangne; fig. 5 et 6). Ils améliorent le comportement et les performances du coussin en reportant à la périphérie le cloisonnement de son dispositif d'alimentation du véhicule et accroissent la stabilité du véhicule sans mettre en jeu le frottement des éléments souples sur le sol.

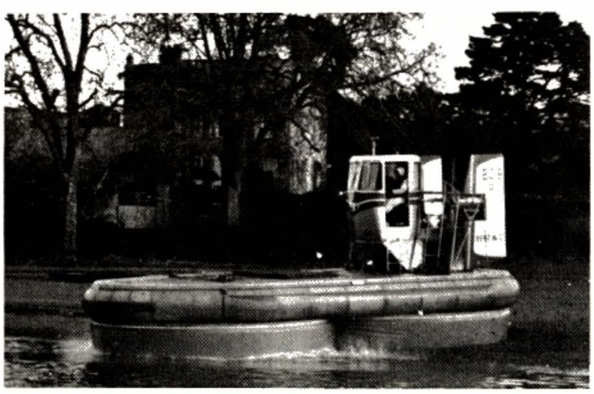


Fig. 3 — Aéroglisseur BC-8 équipé d'une jupe périphérique entourant les 7 jupes élémentaires (*S.E.D.A.M.*)

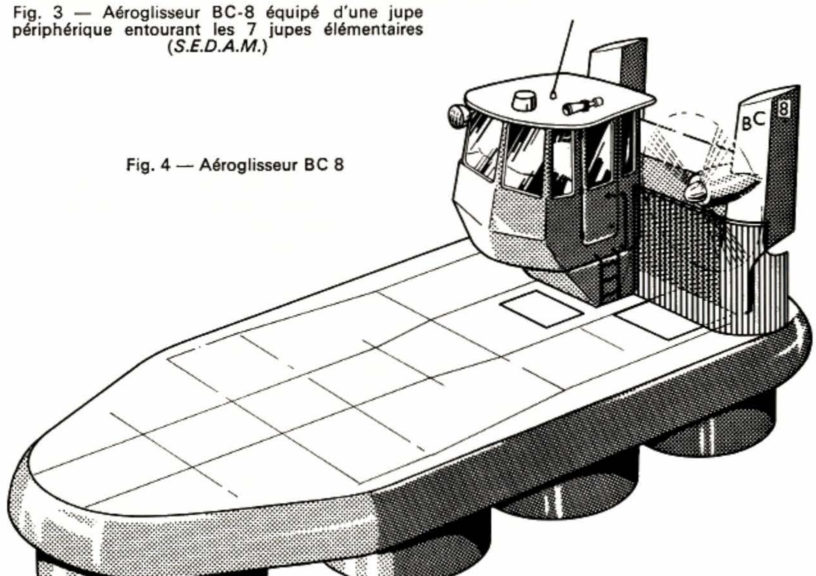
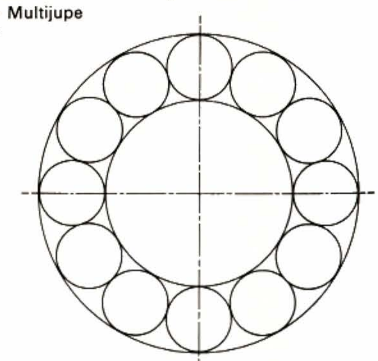


Fig. 4 — Aéroglisseur BC 8

Fig. 5 — Multijupe annulaire



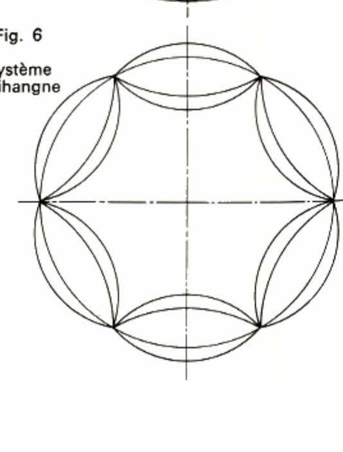


Fig. 6

Système Grihangne

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPES

1. NOTATIONS UTILISÉES

1.1. Paramètres de définition

1.1.1. Géométrie du véhicule

	Unité (Symbole)	Symbole
Longueur hors tout	m	L
Largeur hors tout	m	l
Hauteur des jupes	m	H
Hauteur moyenne mouillée des quilles latérales	m	H_q
Longueur mouillée des quilles latérales	m	L_q
Surface du maître-couple dans l'air	m²	Σ

1.1.2. Géométrie du coussin d'air

	Unité (Symbole)	Symbole
Longueur du coussin	m	L_c
Largeur du coussin	m	b
Surface du coussin	m²	S
Allongement du coussin $\left(\frac{S}{b^2}\right)$	(1)	λ

1.1.3. Masses — Centrage des masses

	Unité (Symbole)	Symbole
Masse de l'aéroglisseur	kg	M
Masse de structure	kg	M_a
Masse de la motorisation	kg	M_b
Masse d'équipements (aménagements toutes missions)	kg	M_c
Masse à vide équipé ($M_a + M_b + M_c$)	kg	M_v
Masse d'aménagements selon mission	kg	M_d
Masse d'équipage	kg	M_e
Masse de combustible	kg	M_f
Charge marchande	kg	C_g
Charge mobile ($M_f + C_g$)	kg	C_m
Charge utile ($M_d + M_e + M_f + C_g$)	kg	C_u

1.2. Paramètres de fonctionnement

1.2.1. Motorisation

	Unité (Symbole)	Symbole
Puissance maximale continue de l'ensemble des unités motrices	kW	W_t
Fréquence de rotation (ou régime) de l'arbre de sortie	tr/mn	N
Consommation spécifique	g/kW.h	C_s
Débit en masse air de motorisation	kg/s	m_a

1.2.2. Propulsion

	Unité (Symbole)	Symbole
Puissance absorbée par propulseur	kW	W_p
Couple sur arbre propulseur	kN.m	C_p
Régime du propulseur	tr/mn	N_p
Traction brute du propulseur	N	F_p

1.2.3. Sustentation

	Unité (Symbole)	Symbole
Puissance absorbée par générateur	kW	W_s
Puissance totale communiquée à l'air de sustentation par ventilateur (puissance cinétique)	kW	W_c
Puissance du jet d'air de fuite	kW	W_j
Couple sur arbre ventilateur	kN.m	C_v
Régime du ventilateur	tr/mn	N_v
Débit total en volume de l'air de sustentation	m³/s	Q
Débit en volume d'un ventilateur	m³/s	Q_v
Débit en masse du ventilateur	kg/s	q
Pression relative totale engendrée sous les ventilateurs	Pa	p_t
Pression relative statique	Pa	p_s
Pression relative dynamique	Pa	p_d
Pression relative moyenne du coussin d'air	Pa	p_c
Pression relative génératrice de la fuite périphérique	Pa	p_j
Section géométrique de fuite d'air périphérique	m²	S_f
Coefficient de striction	(1)	σ
Vitesse d'éjection au bas de la jupe périphérique	m/s	V_j
Enfoncement dans l'eau du coussin d'air	m	e
Pente du coussin par rapport à l'eau	(1)	π_e

$\pi_e = \frac{p_c}{\rho_e . g . c}$ (g : accélération terrestre)

1.3. Environnement — Perturbations

1.3.1. Conditions marines

	Unité (Symbole)	Symbole
Longueur d'onde de la houle	m	Λ
Période de la houle	s	T
Hauteur de vagues	m	H_v
Hauteur arithmétique significative des vagues	m	$H_{\frac{1}{3}}$
Masse volumique de l'eau	kg/m³	ρ_e
Angle de la vitesse relative par rapport à l'eau et de l'axe longitudinal de l'appareil (dérive)	degrés	j_e

1.3.2. Conditions atmosphériques

	Unité (Symbole)	Symbole
Vitesse moyenne du vent	m/s	V_m
Masse volumique de l'air	kg/m³	ρ_a
Angle de la vitesse relative par rapport à l'air avec l'axe longitudinal (dérapage)	degrés	j_a

1.3.3. Forces et moments des forces extérieures

	Unité (Symbole)	Symbole
Poids de l'aéroglisseur	N	G
Portance aérodynamique	N	F_z
Poussée nette de l'ensemble des propulseurs	N	P
Traînée totale	N	T_t
Traînée d'onde	N	T_o
Traînée de jupe	N	T_j
Traînée d'embrun	N	T_e
Traînée de vague	N	T_v
Traînée de quilles	N	T_q
Traînée hydrodynamique	N	T_h
Traînée de captation	N	T_c
Réaction de jet	N	R_j
Traînée aérodynamique	N	T_a
Force latérale aérodynamique	N	F_y
Moment de roulis	m ∧ N	L_1
Moment de tangage	m ∧ N	M_1
Moment de lacet	m ∧ N	N_1
Traînée équivalente de sustentation	N	T_s

1.4. Performances

1.4.1. Position et attitude en sustentation du véhicule

	Unité (Symbole)	Symbole
Hauteur de vol	m	h
Immersion	m	i
Assiette longitudinale bas de jupe périphérique	degrés	Θ
Assiette transversale bas de jupe périphérique	degrés	Φ

1.4.2. Caractéristiques de stabilité dynamique

	Unité (Symbole)	Symbole
Raideur propre en pilonnement sur sol	N/m	K_1
Raideur pneumatique	N/m	K_2
Raideur en tangage sur sol	% par degré	K_Θ

(1) Nombre sans dimension.

	Unité (Symbole)	Symbole
Raideur en roulis sur sol	% par degré	K_Φ
Décrément logarithmique	(1)	δ
Facteur d'amortissement	(1)	α

1.4.3. Vitesses et accélérations

Nombre de Reynolds	(1)	$\mathcal{R}$
Coefficient de Newman	(1)	ξ
Nombre de Froude/eau	(1)	$\mathcal{F}_e$
Nombre de Froude/air	(1)	$\mathcal{F}_a$
Vitesse nominale de l'aéroglisseur	m/s	V
Vitesse par rapport au sol	m/s	V_s
Vitesse par rapport à l'air	m/s	V_a
Vitesse par rapport à l'eau	m/s	V_e
Vitesse angulaire de roulis	rad/s	ω_x
Vitesse angulaire de tangage	rad/s	ω_y
Vitesse angulaire de lacet	rad/s	ω_z
Accélération longitudinale	m/s²	γ_x
Accélération transversale	m/s²	γ_y
Accélération verticale (au centre de gravité: Γ_x, Γ_y, Γ_z)	m/s²	γ_z

1.4.5. Rendements — Critères de qualité

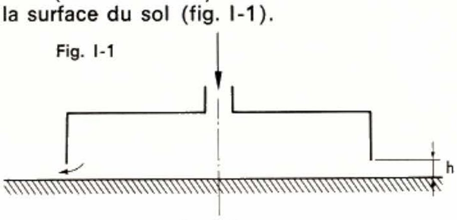
Coefficient d'amplification de poussée	A
Rendement de sustentation	η_s
Rendement de générateur d'air	η_v
Rendement de coussin	η_c
Rendement propulsif	η_p
Rendement d'hélice	η_H
Rendement global	η_g
Finesse	f

2. LA SUSTENTATION

2.1. Sustentation aérostatique

2.1.1. La cloche. — C'est le plus simple des coussins d'air. Il est constitué schématiquement d'un cylindre vertical ouvert à l'extrémité inférieure, fermé à l'autre par un fond rigide percé d'un orifice permettant d'assurer l'alimentation en air du volume ainsi constitué. Dès que la cloche est alimentée par de l'air sous pression, elle se soulève et laisse échapper l'air par l'intervalle de fuite ainsi créé (hauteur de vol) entre le bord inférieur de la cloche et la surface du sol (fig. I-1).

Fig. I-1



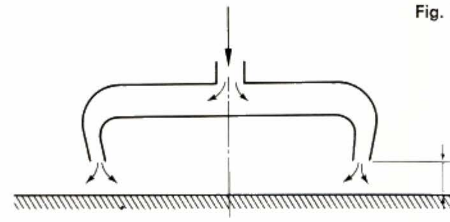
La cloche

Nous verrons plus loin que, pour réduire la puissance nécessaire à la sustentation, il faut que la hauteur de vol soit la plus faible possible ; dans ce cas les obstacles franchissables sont alors très petits. Pour augmenter leur hauteur, sans installer une puissance prohibitive, une jupe conique en matériau souple remplace la partie inférieure du cylindre rigide. La souplesse de cette jupe permet à la cloche le franchissement d'obstacles dont la hauteur est de l'ordre de grandeur de celle de la jupe, donc bien supérieure à la hauteur de vol.

2.1.2. Le jet périphérique. — Le dispositif le plus simple des coussins à jet périphérique est constitué par deux cylindres concentriques emboîtés l'un dans l'autre qui ménagent un espace annulaire de faible épaisseur pouvant être alimenté en air à la partie supérieure ; quand le système d'alimentation fournit de l'air sous pression, un jet circulaire s'échappe de l'anneau inférieur formant un rideau d'air qui confine un volume d'air en surpression assurant la sustentation du dispositif (fig. I-2).

Avec la même puissance, la hauteur de vol du coussin à jet périphérique incliné à 45° vers l'intérieur est supérieure

Fig. I-2



Le jet périphérique

à celle du type «à cloche». Toutefois, la puissance nécessaire croît très vite avec la hauteur des obstacles à franchir. Pour la limiter, une paroi souple s'effaçant devant l'obstacle est nécessaire, ce qui impose pratiquement l'utilisation du coussin à cloche.

2.1.3. Système André Grihangne. — L'air fourni par le dispositif d'alimentation est dirigé directement dans plusieurs alvéoles compris entre deux parois souples associées et fixées à la périphérie de la plate-forme. Ces alvéoles ont deux rôles. Premièrement, ils confinent l'air du coussin et, deuxièmement, ils créent une stabilité d'assiette importante.

Le fonctionnement d'un tel système assure une pression pratiquement uniforme p_c.

La pression du coussin est donnée par la relation: $p_c S = G$ en appelant S la surface du coussin limitée par les parois extérieures des alvéoles.

2.1.4. Les quilles latérales. — Le souci de réduire le plus possible la puissance de sustentation des aéroglisseurs a fait naître un nouveau concept de coussin. Les parois latérales souples sont remplacées par des parois rigides formant quilles. Leur profondeur d'immersion est telle que, dans presque tout le domaine de vol de l'aéroglisseur, l'air du coussin ne puisse s'échapper latéralement. À l'avant et à l'arrière des structures souples réduisent les fuites d'air au minimum.

Cette solution fait évidemment perdre à l'aéroglisseur son caractère amphibie et augmente sa traînée hydrodynamique.

2.2. Sustentation aérodynamique en effet de sol. — Les deux types de coussin décrits sont dits à sustentation aérostatique car ils permettent à l'appareil d'être en vol depuis la vitesse nulle jusqu'à la vitesse maximale prévue.

La sustentation aérodynamique, au contraire, exige une vitesse relative par rapport à l'air, supérieure à la vitesse de *décollage*. Une fois décollé, l'aéroglisseur profite de l'effet de sol en volant au voisinage de la surface. C'est la portance aérodynamique augmentée par l'interaction des surfaces portantes et du sol qui assure sa sustentation.

3. L'EFFET DE SOL

Considérons une plate-forme circulaire de poids G, équipée d'un coussin d'air à cloche. Quand le générateur d'air est en fonctionnement, elle est en équilibre à une hauteur h au-dessus du sol.

Soit A le coefficient d'amplification de poussée défini par:

$$A = \frac{G}{qV_j} \quad (1)$$

qV_j représente le flux de quantité de mouvement de l'air qui s'échappe du bord inférieur du coussin ; G représente la force de sustentation du coussin égale au poids de la plate-forme.

Le coefficient A permet de comparer la portance réelle du coussin à celle qu'il aurait si le même flux de quantité de mouvement qV_j était vertical (théorème des quantités de mouvement).

Dans l'expérience schématisée par la figure I-3, ce flux de quantité de mouvement est horizontal et la portance du coussin est créée uniquement par la pression qui s'exerce sur les parois internes du cylindre:

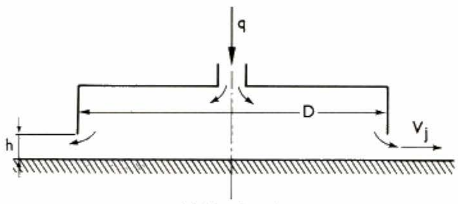
$$G = p_c S \quad (2)$$

(1) Nombre sans dimension.

Explicitons le coefficient A dans ce cas.
Le débit en masse q est donné par :

$$q = \rho_a \sigma h L_j V_j \qquad (3)$$

Fig. I-3



L'effet de sol

(L_j est le périmètre de la plate-forme : $L_j = \pi D$).
La relation de Bernoulli qui lie la vitesse d'éjection V_j à la pression du coussin donne :

$$p_c = \frac{\rho_a}{2} V^2_j \qquad (4)$$

D'où l'expression de A :

$$A = \frac{S}{2\sigma h L_j} \qquad (5)$$

Le coussin étant circulaire $\frac{S}{L_j} = \frac{\pi D^2/4}{\pi D} = \frac{D}{4}$

et :

$$A = \frac{D}{8\sigma h} \qquad (6)$$

Plus généralement, en appelant D_4 le diamètre du cercle hydraulique d'un coussin quelconque, c'est-à-dire le *diamètre du cercle ayant le même rapport surface-périmètre,* le coefficient d'amplification s'écrit :

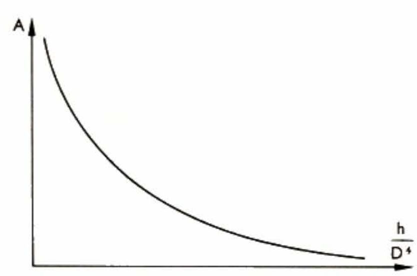
$$A = \frac{D_4}{8\sigma h} \qquad (6')$$

Les hypothèses simplificatrices adoptées au cours de ce calcul élémentaire ne permettent d'utiliser cette formule que pour des valeurs du rapport $\frac{D_4}{h}$ supérieurs à 5.

La figure I-4 donne l'allure de la courbe $A = f\left(\frac{h}{D_4}\right)$.

Fig. I-4

Courbe du coefficient d'amplification de poussée



Dans le cas des aéroglisseurs $\frac{D_4}{h}$ varie de 20 à 100 et A est compris entre 5 et 20.

Ces valeurs sont importantes ; elles traduisent ce qu'il est convenu d'appeler *l'effet de sol* aérostatique. Au voisinage du sol, pour une puissance cinétique du jet donné :

$$W_j = \frac{1}{2} q V^2_j \qquad (7)$$

Le coefficient d'amplification A (V. équation 6), toutes choses égales d'ailleurs, est inversement proportionnel à la hauteur de vol.

Or, cette énergie est fournie au jet par un générateur d'air dont la puissance doit tenir compte des rendements du générateur et, éventuellement, des transmissions et des pertes de charge de l'écoulement dans les conduits d'adduction d'air et dans le coussin.

La réduction de la hauteur de vol, si elle est possible, diminue donc la puissance de sustentation nécessaire pour soulever la plate-forme.

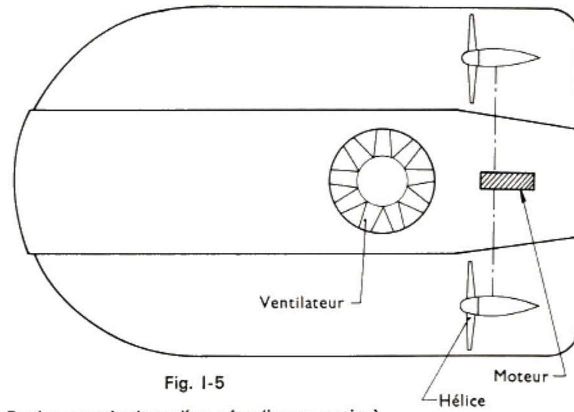
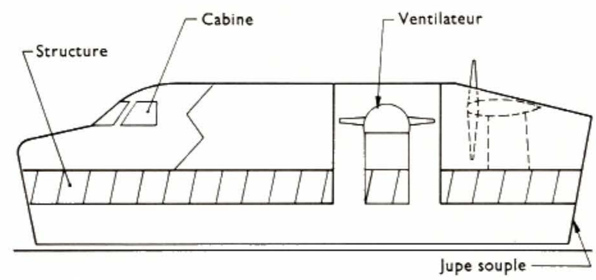


Fig. I-5

Parties constitutives d'un aéroglisseur marin à jupe souple



4. LES AÉROGLISSEURS MARINS À JUPES SOUPLES (A.J.S.)

4.1. Parties constitutives. — Avant d'aborder l'étude de l'aérodynamique, de l'hydrodynamique et de la mécanique du vol des aéroglisseurs à jupes souples, il est important dès maintenant de préciser les parties constitutives qui se retrouvent dans tous les appareils de ce type.

Un aéroglisseur à jupes souples (fig. I-5) comprend :

— une structure rigide qui supporte la charge marchande et à laquelle sont fixés les différents sous-ensembles constitutifs de l'appareil ;

— un système propulsif constitué soit par des hélices aériennes libres ou carénées, soit par des hélices marines, soit par des jets d'air ou d'eau ;

— un dispositif de sustentation comprenant le coussin d'air à jupes souples et les générateurs d'air qui l'alimentent. Ces générateurs sont des ventilateurs centrifuges ou axiaux ;

— un groupe moteur qui fournit la puissance de propulsion et de sustentation ; le circuit de carburant et le circuit de refroidissement ;

— une cabine de pilotage intégrée ou non devant assurer un bon champ de vision à l'équipage (pilote plus éventuellement navigateur et radariste) ;

— des dispositifs de commande qui doivent permettre de donner à l'appareil une bonne manœuvrabilité aussi bien en vol de croisière qu'au voisinage du port (pas différentiel des hélices, rotation des propulseurs, gouvernes dans le jet des hélices, déviation de jet, déplacement du centre de poussée du coussin d'air, évents, etc.) ;

— des circuits de servitude : pneumatique, hydraulique et électrique ;

— un système d'atterrissage constitué simplement par des patins situés généralement dans le coussin d'air et fixés élastiquement à la structure ou par un véritable train de roulement orientable ou non ;

— des points de levage, de hissage, de remorquage, de mouillage, etc.

4.2. Aérodynamique de la cellule. — Les forces et moments agissant sur un aéroglisseur sont créés, d'une part, par le mouvement relatif de l'air ambiant, d'autre part, par action du fluide au-dessus duquel il vole. Si les premiers peuvent être déterminés avec précision, soit par le calcul, soit, préférablement, par des essais en soufflerie de maquettes plus ou moins « sophistiquées », une partie des

seconds est difficile à connaître car ils résultent pour la plupart du contact des jupes avec le fluide.

Dans le domaine de l'aérodynamique, l'expérience des aérodynamiciens, chargés de fournir tous les coefficients aérodynamiques stationnaires et instationnaires nécessaires à la définition d'un projet d'avion, est directement transposable au domaine des aéroglisseurs.

La seule singularité essentielle est due à la présence du sol qu'il faut introduire dans les calculs par la méthode dite des *images* et qui nécessite quelques précautions pour la réalisation des essais en soufflerie.

Le stade actuel de développement des études du comportement dynamique des aéroglisseurs ne rend pas encore impératif la détermination des coefficients aérodynamiques instationnaires et les seuls coefficients à connaître sont:

$$C_x,\ C_z,\ C_y,\ C_m,\ C_n,\ C_l,$$

en fonction de l'incidence i et du dérapage j (V. t. 4, Aéronautique, chap. 1).

Mais, tandis que sur les avions i et j varient respectivement de $-10°$ à $+25°$ et de $\pm 15°$, ils varient de $\pm 5°$ et de $\pm 180°$ sur les aéroglisseurs.

La limitation en incidence est due à la présence de la surface au-dessus de laquelle évolue l'aéroglisseur et avec laquelle la structure ne doit pas entrer en contact, sauf dans des conditions anormales et exceptionnelles. Il faut assimiler le sol à une surface de courant, ce qui s'obtient très facilement en considérant l'écoulement autour d'un corps fictif constitué par l'appareil lui-même et son image par rapport au plan.

Les valeurs importantes de l'angle de dérapage sont dues au fait que la vitesse par rapport au sol étant le plus souvent, pour ne pas dire toujours, imposée, la vitesse aérodynamique peut avoir une direction quelconque par rapport à l'axe de l'appareil (fig. I-6). Il arrive même qu'à vitesse réduite par

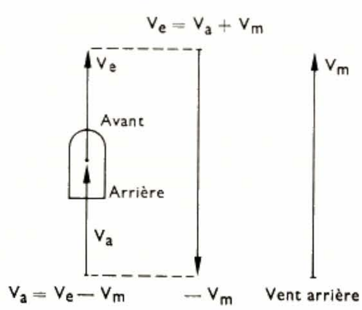


Fig. I-6

rapport au sol, et par fort vent arrière (conditions qui se réalisent dans certains cas de manœuvre) la vitesse aérodynamique soit dirigée d'arrière en avant.

Cette obligation impose souvent un montage particulier de la maquette dans la soufflerie et n'a pas été suffisamment prise en considération pour la conception des aéroglisseurs actuellement réalisés.

4.2.1. Trainée $F_x = C_x \rho_a S \frac{V_a^2}{2}$.

— La surface de référence S peut être, soit celle du maître-couple, soit celle du coussin au bas de jupe. Le coefficient aérodynamique de trainée varie avec le nombre de Reynolds $\mathcal{R} = \frac{V_a L}{\nu}$ surtout au voisinage du nombre de Reynolds critique.

Il varie aussi avec le nombre de Mach $\left(M = \frac{V_a}{a}\right)$. Le coefficient C_x des aéroglisseurs actuels varie de 0,2 à 0,5

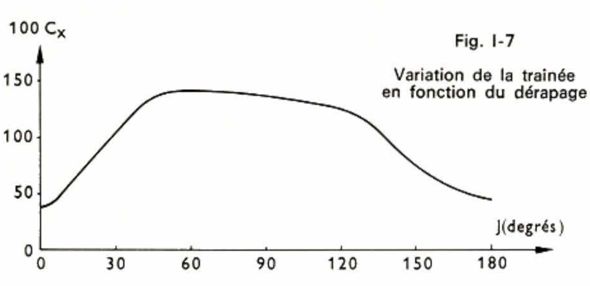


Fig. I-7
Variation de la trainée en fonction du dérapage

à $j = 0$ en prenant comme surface de référence celle du maître-couple.

Compte tenu des domaines de variation, l'influence de i est faible mais celle de j est importante; C_x peut doubler et même tripler pour des valeurs de j comprises entre 50° et 130° (fig. I-7).

4.2.2. Portance $F_z = C_z \rho_a S \frac{V_a^2}{2}$.

— Par suite de la présence du sol, le coefficient C_z est loin d'être négligeable.

Avec la surface du maître-couple comme référence, il peut atteindre 0,5 à 1 à $j = 0$. Il peut tripler pour des valeurs de j comprises entre 50° et 130° (fig. I-8).

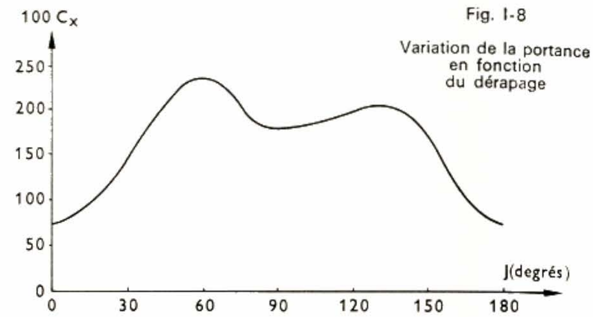


Fig. I-8
Variation de la portance en fonction du dérapage

En vol, il faut tenir compte de ce complément de portance qui réduit la masse effective de l'aéroglisseur et modifie de façon sensible son bilan de puissance à hauteur de vol constante.

4.2.3. Force latérale $F_y = C_y \rho_a S \frac{V_a^2}{2}$.

— En fonction du dérapage la variation de C_y est pseudo-sinusoïdale. Nul pour $j = 0$, 90° et 180°, C_y atteint un maximum positif vers 45° et un maximum négatif vers 130°. Ses maximums peuvent atteindre 1 sur des machines allongées, la surface de référence étant toujours celle du maître-couple (fig. I-9).

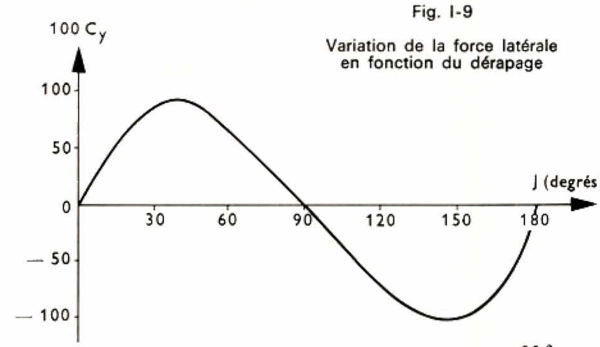


Fig. I-9
Variation de la force latérale en fonction du dérapage

4.2.4. Moment de tangage $M_1 = C_{m1} \rho_a S C \frac{V_a^2}{2}$.

— (C est une longueur de référence, généralement la longueur du coussin).

Le coefficient C_{m1} est le plus souvent positif (moment cabreur) mais sa valeur dépend beaucoup de la disposition des superstructures de l'appareil.

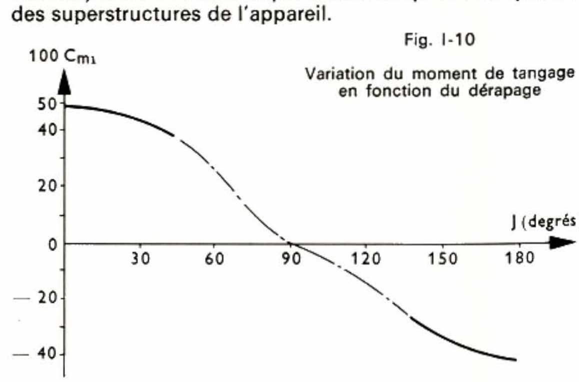


Fig. I-10
Variation du moment de tangage en fonction du dérapage

Il est aussi très sensible au dérapage. À titre purement indicatif, l'ordre de grandeur de C_{m1} dans des axes liés à l'appareil est 0,5. Sa variation avec le dérapage est, pour les machines allongées, une semi-sinusoïde qui passe par zéro pour $j = 90°$ (fig. I-10).

En vol, ce moment modifie l'assiette de l'appareil et peut provoquer l'écopage des jupes arrière à partir d'une certaine vitesse ; cela augmente la traînée hydrodynamique, diminue le confort des passagers, accélère l'usure des jupes allant même jusqu'à les déchirer et les arracher. Il faut donc tenir compte de ce moment dans l'étude de la mécanique du vol des aéroglisseurs et dans leur conception générale. Cette nécessité est mieux comprise pour les projets à l'étude.

4.2.5. Moment de lacet $N_1 = C_{n1}\,\rho_a\,S\,C\,\dfrac{V_a^2}{2}$. — C'est lui qui agit directement sur la stabilité de l'aéroglisseur si les forces hydrodynamiques dues au contact des jupes avec l'eau ne sont pas prises en considération. La pente de la courbe $C_n(j)$ doit être négative (le moment de lacet doit être négatif quand l'angle de dérapage est positif) pour que l'appareil soit aérodynamiquement stable. Compte tenu du très grand nombre de conditions différentes dans lesquelles un aéroglisseur doit voler (vol de croisière, virage, freinage, approche, entrée et sortie du port, etc., par vents de toutes les directions) les spécialistes ne sont pas d'accord sur les zones de dérapage où l'appareil doit être naturellement stable. Cependant, les courbes $C_n(j)$ des appareils existants sont des pseudo-sinusoïdes qui passent par zéro lorsque j est égal à 0°, 50 à 90° et 180° ; elles présentent deux maximums, l'un positif voisin de 0,1 vers 50° et l'autre négatif voisin de — 0,3 vers 130° (fig. I-11).

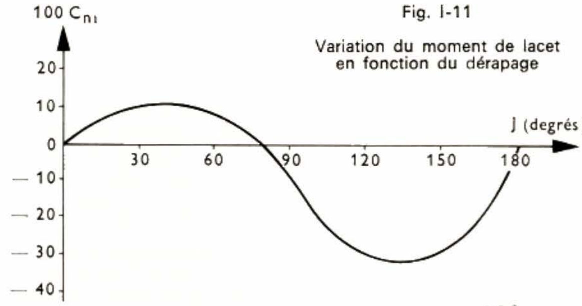


Fig. I-11

Variation du moment de lacet en fonction du dérapage

4.2.6. Moment de roulis $L_1 = C_{l1}\,\rho_a\,S\,C\,\dfrac{V_a^2}{2}$. — Le moment de roulis rapporté au centre de gravité de l'appareil est toujours très faible mais il joue cependant un rôle important dans les évolutions. En particulier, dans les virages, ce moment incline l'appareil vers l'intérieur du virage, ce qui a pour effet de créer une force transversale opposée à la force d'inertie centrifuge (réaction de jet) et un frottement hydrodynamique des jupes situées à l'intérieur du virage.

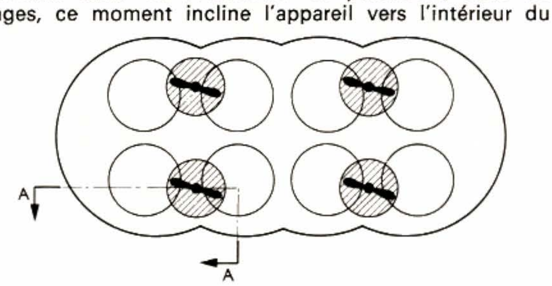
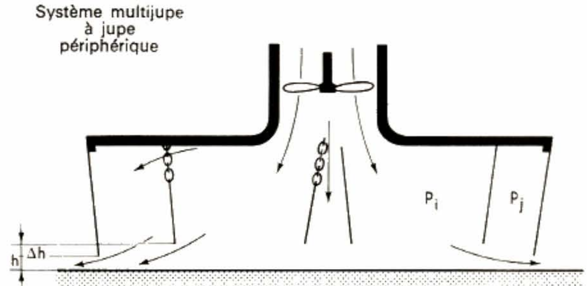


Fig. I-12

Système multijupe à jupe périphérique



4.3. Forces et moments aérodynamiques liés à la sustentation. — Le rôle essentiel du coussin d'air est de créer, en profitant de l'effet de sol, les forces verticales qui assurent la sustentation de l'aéroglisseur à une certaine hauteur h au-dessus du sol.

L'analyse du fonctionnement global du coussin d'air va faire apparaître d'autres forces d'origine aérodynamique qui s'ajoutent à celles qui ont déjà été définies dans le paragraphe précédent.

Le coussin *cloche simple* déjà décrit sustente une plate-forme à une hauteur de vol h. L'expérience et les calculs montrent que cette plate-forme à cloche unique est stable en hauteur. En effet, si pour une raison quelconque la plate-forme a tendance à descendre, le débit de fuite diminue, la pression fournie par le générateur d'air augmente et la plate-forme remonte à sa hauteur de vol initiale (et inversement). Elle est donc en équilibre stable à la hauteur h. Ce problème sera étudié plus en détail dans le chapitre consacré à l'étude de la stabilité de l'aéroglisseur. En revanche, comme le montrent les essais et les calculs, la cloche simple a une stabilité d'assiette insuffisante. Il a donc été nécessaire de compliquer le coussin d'air pour lui donner une stabilité d'assiette correcte.

Plusieurs systèmes de coussins issus de la cloche simple ont été retenus : le système multijupe à jupe périphérique ou multijupe annulaire, le système à labyrinthe cloisonné, etc.

Ces systèmes ne diffèrent d'ailleurs que par la façon dont est réalisé le coussin central qui reçoit la totalité ou une faible partie du flux d'air d'alimentation.

Dans le multijupe, n jupes coniques sont alimentées directement par le ou les générateurs d'air (fig. I-12). Elles alimentent ensuite l'enceinte principale par des sections de passage situées en bas et (ou) en haut des jupes. Ce sont ces n jupes qui interviennent pour donner à la plate-forme sa stabilité d'assiette.

Dans le labyrinthe cloisonné (fig. I-13), les n jupes sont remplacées par une jupe unique délimitant une enceinte centrale qui alimente ensuite, par des sections de passage judicieusement aménagées, l'enceinte périphérique et les jupes cloisons qui assurent le compartimentage de cette enceinte annulaire. C'est ce compartimentage qui donne la stabilité d'assiette à ce type de coussin.

Dans les deux cas, une fraction du débit d'air peut être envoyée directement dans l'enceinte principale.

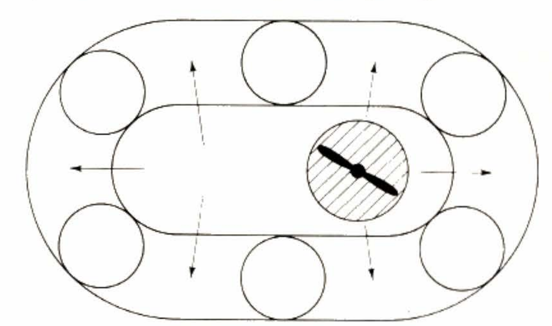
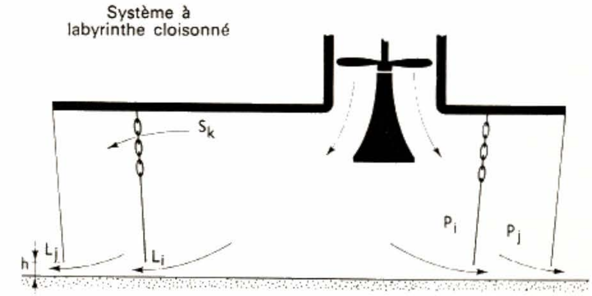


Fig. I-13

Système à labyrinthe cloisonné



4.3.1. Calcul de p_i et p_j. — L'analyse du fonctionnement est effectuée dans le cas le plus général du labyrinthe cloisonné à alimentation répartie.

L'appareil reposant sur un plan uni et horizontal, si le système d'alimentation est mis en route, l'air sous pression le soulève jusqu'à une hauteur h telle que le débit d'air, qui s'échappe de la jupe périphérique par l'intervalle de fuite ainsi créé, soit égal au débit fourni par le système d'alimentation.

Soit p_i et p_j les surpressions par rapport à la pression atmosphérique respectivement dans l'enceinte interne et dans l'enceinte périphérique.

En supposant l'air incompressible (vitesses maximales très inférieures à 100 m/s), pratiquement immobile en dehors des sections de passage, les équations suivantes (3, 4, 5) expriment que:

— le débit en masse q de l'air d'alimentation se conserve;
— le poids de l'appareil est égal à la portance du coussin.

$$p_i - p_j = \frac{\rho_a}{2} V_i^2 \quad (1)$$

$$p_j = \frac{\rho_a}{2} V_j^2 \quad (2)$$

$$\rho_a (L_i.h + S.k) V_i = q_c \quad (3)$$

$$= (L_i.h + S.k)\sqrt{2\rho_a (p_i - p_j)} = (1-f)q$$

$$q_j = L_j h \sqrt{2\rho_a}\sqrt{p_j} = q \quad (4)$$

$$p_i S_i + p_j S_j = G \quad (5)$$

$$S_i + S_j = S \quad (6)$$

f_q est la fraction de débit qui alimente directement l'enceinte périphérique.

Pour simplifier l'écriture, les sections de passage $L_i.h$, $L_j.h$ et $S.k$ tiennent compte des coefficients de striction; ce sont des sections aérodynamiques.

En combinant (3) et (4) nous obtenons:

$$L_j h\sqrt{p_j}\,(1-f) = (L_i h + Sk)\sqrt{p_i - p_j} \quad (7)$$

qui, avec (5), donne:

$$p_j = \frac{G}{S}\,\frac{1}{1 + \frac{S_i}{S}\left[\frac{L_j h\,(1-f)}{L_i h + Sk}\right]^2} \quad (8)$$

$$p_i = \frac{G}{S}\,\frac{1 + \left[\frac{L_j h\,(1-f)}{L_i h + Sk}\right]^2}{1 + \frac{S_i}{S}\left[\frac{L_j h\,(1-f)}{L_i h + Sk}\right]^2} \quad (9)$$

4.3.2. Puissance nette de sustentation. — Elle est donnée par:

$$W_s = Q.p_i \quad (10)$$

$$Q = L_j h\sqrt{\frac{2}{\rho_a}\,p_j} \quad (11)$$

$$W_s = L_j h\sqrt{\frac{2}{\rho_a}}\left(\frac{G}{S}\right)^{\frac{3}{2}}\frac{1 + \left[\frac{L_j h\,(1-f)}{L_i h + Sk}\right]^2}{\left[1 + \frac{S_i}{S}\left(\frac{L_j h\,(1-f)}{L_i h + Sk}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

Cette puissance sera utilisée par la suite pour calculer le bilan de puissance d'un aéroglisseur.

4.3.3. Cas particuliers. — Les formules (8), (9) et (12) sont très générales.

Elles se simplifient énormément dans le cas d'une cloche unique car:

$$p_i = p_j,\quad L_i = L_j,\quad S_i = S = S_j,\quad Sk = 0,\quad f = 0$$

La pression relative moyenne est alors égale à:

$$p_c = \frac{G}{S} \quad (13)$$

La puissance nette de sustentation a pour valeur:

$$W_s = Lh\sqrt{\frac{2}{\rho_a}}\left(\frac{G}{S}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (14)$$

Les valeurs de p_i, p_j et W_s pour un système multijupe, avec jupe périphérique ou annulaire, sont également fournies par ces relations; S_i est alors la surface totale des n jupes internes. Si, de plus, $Sk = 0$, c'est-à-dire si l'alimentation de l'enceinte périphérique ne s'effectue que par la base des jupes internes qui est à la même hauteur au-dessus du sol que la jupe périphérique, il vient:

$$p_j = \frac{G}{S}\,\frac{1}{1 + \frac{S_i}{S}\,\frac{L_j^2\,(1-f)}{L_i^2}} \quad (15)$$

$$p_i = \frac{G}{S}\,\frac{1 + \frac{L_i^2\,(1-f)^2}{L_i^2}}{1 + \frac{S_i}{S}\,\frac{L_j^2}{L_i^2}\,(1-f)^2} \quad (16)$$

$$W_s = L_j h\sqrt{\frac{2}{\rho_a}}\left(\frac{G}{S}\right)^{\frac{3}{2}}\frac{1 + \frac{L_j^2}{L_i^2}\,(1-f)^2}{\left[1 + \frac{S_i}{S}\,\frac{L_j^2}{L_i^2}\,(1-f)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (17)$$

La formule (14) montre que la puissance nette de sustentation varie:

— proportionnellement à la hauteur de vol;
— proportionnellement au périmètre de fuite;
— comme la puissance $\frac{3}{2}$ du poids de l'appareil;
— comme l'inverse de la puissance $\frac{3}{2}$ de la surface du coussin.

Le terme:

$$\frac{1 + \left[\frac{L_j h\,(1-f)}{L_i h + Sk}\right]^2}{\left[1 + \frac{S_i}{S}\left(\frac{L_j h\,(1-f)}{L_i h + Sk}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$

mis en évidence dans la relation (12) donnant la puissance nette des coussins avec labyrinthe cloisonné et multijupes à jupes périphériques, compte tenu des valeurs moyennes de L_i, L_j, h, f et Sk, est toujours très voisin de 1. Il reste compris entre 0,9 et 1,1 quand $\frac{S_i}{S}$ varie de 0,5 à 0,7.

La valeur de la puissance nette de sustentation donnée par les formules ci-dessus est exacte quand l'aéroglisseur est en vol stationnaire à assiette nulle, sur un plan horizontal et uni; elle n'est qu'approximative quand il se déplace au-dessus d'un terrain peu « rugueux » ou d'une mer peu agitée à une vitesse supérieure à la vitesse de déjaugeage; dans tous les autres cas, elle ne donne qu'un ordre de grandeur.

4.3.4. Traînée de captation. — Quand l'appareil se déplace à une vitesse V_a par rapport à l'air, l'air qui s'échappe du coussin doit être remplacé constamment par de l'air « frais ». Pris au repos à l'extérieur, il faut lui communiquer la vitesse V_a de l'appareil par rapport à l'air ambiant. Le théorème des quantités de mouvement permet d'écrire que la traînée de captation est égale à:

$$T_c = qV_a \quad (18)$$

En tenant compte des équations (4) et (8):

$$T_c = L_j h\sqrt{2\rho_a}\,V_a\left[\frac{G}{S}\,\frac{1}{1 + \frac{S_i}{S}\left(\frac{L_j h\,(1-f)}{L_i h + Sk}\right)^2}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Cette traînée est dirigée dans le sens du vent relatif et elle est appliquée, en première approximation au bord d'attaque de l'entrée d'air de sustentation; elle peut donc créer, par rapport au centre de gravité de l'appareil, des moments de tangage et de roulis.

Si la hauteur de vol h est constante, c'est-à-dire si l'assiette de l'appareil est horizontale, au-dessus d'un sol horizontal, la résultante des débits de quantités de mouvement du jet périphérique est nulle et la résultante des forces est nulle. La traînée de captation s'ajoute donc en totalité à la traînée aérodynamique qui s'exerce sur l'appareil.

4.3.5. Réaction de jet d'un coussin à assiette non nulle. — Si un moment de tangage (ou de roulis) est



Fig. I-14

Calcul de la réaction de jet

appliqué à un aéroglisseur équilibré au départ, l'assiette longitudinale (ou transversale) du coussin d'air n'est plus horizontale et les débits de quantité de mouvement ne sont pas les mêmes vers l'avant et vers l'arrière (ou vers bâbord et vers tribord) car :

1° Les hauteurs de vol, donc les surfaces de fuite, ne sont pas les mêmes à l'avant et à l'arrière (ou à bâbord et à tribord).

2° Les pressions génératrices sont différentes ; elles sont plus faibles quand h est grand et plus fortes quand h est petit.

Il va donc apparaître une force longitudinale (ou transversale) liée à l'appareil, égale à la différence des débits de quantité de mouvement, qu'il est généralement admis d'ajouter algébriquement à la poussée longitudinale (ou transversale) du système propulsif de l'appareil. Cette façon de procéder laissera inchangées la traînée de captation et la traînée aérodynamique.

Cette réaction de jet est appliquée au niveau de la section de fuite. Elle crée donc un moment par rapport au centre de gravité de l'appareil dont il faut tenir compte pour écrire son équilibre longitudinal (ou transversal).

Le calcul de la réaction de jet ne présente pas de difficultés. Dans chaque cas il faut l'effectuer pour la forme en plan du bas de la jupe périphérique.

Le principe du calcul est le suivant : on calcule la réaction de jet en superposant la réaction de jet d'une surface de fuite de hauteur h constante sur tout le périmètre du bas de jupe à celle d'une surface de fuite formée par le bas de la jupe périphérique quand sa partie avant (ou bâbord) est en contact avec le sol (fig. I-14).

4.4. Hydrodynamique du coussin. — Après avoir passé en revue les forces aérodynamiques qui s'exercent sur un aéroglisseur il faut, pour connaître toutes les forces qui agissent sur lui, étudier maintenant les forces et moments d'origine hydrodynamique.

Une remarque évidente doit être faite dès le début de ce paragraphe car il importe de l'avoir toujours présente à l'esprit. Alors que la masse volumique de l'air est voisine de 1,25 kg/m³, celle de l'eau est voisine de 1 000 kg/m³ ; elle est 800 fois plus grande.

Il convient aussi d'attirer l'attention sur la difficulté de connaître avec précision certaines de ces forces. Hydrodynamiquement, l'aéroglisseur ne se comporte pas comme un navire dont la coque est partiellement mais en permanence immergée ; quand il vole par mer calme, sa structure, jupes comprises, n'est que très localement, et le plus souvent par intermittence, en contact avec l'eau. L'ignorance actuelle ne permet pas d'analyser les forces hydrodynamiques aussi précisément que les forces aérodynamiques ; les seules forces qui sont prises en considération sont les traînées.

La traînée hydrodynamique totale d'un aéroglisseur est la somme des trois termes :

- la traînée d'onde ;
- la traînée de vague ;
- la traînée d'embrun et de jupe.

4.4.1. Traînée d'onde. — C'est la seule qui se prête à des calculs théoriques ; c'est la mieux connue et les résultats expérimentaux obtenus au bassin des carènes confirment, dans certaines limites, les valeurs calculées.

Un aéroglisseur en vol stationnaire au-dessus de l'eau creuse un trou dont la profondeur ou enfoncement e (V. fig. I-20) est donnée par la formule :

$$e = \frac{p_c}{\rho_e \cdot g} \qquad (1)$$

qui traduit l'équation fondamentale de l'hydrostatique : lorsqu'un fluide n'est soumis qu'à l'action de la pesanteur, la pression est la même en tous les points d'un plan horizontal.

Si la pression p_c est exprimée en hauteur d'eau, e est égal à cette hauteur.

Quand l'aéroglisseur se déplace au-dessus de l'eau, « il déplace avec lui ce trou » qui joue le rôle d'une carène fluide. Comme pour les bateaux, le déplacement de cette carène crée des ondes qui dissipent de l'énergie. Cette dissipation est à l'origine de la traînée d'onde de l'aéroglisseur.

Le calcul théorique de cette traînée T_o a été effectué indépendamment par plusieurs physiciens anglais et américains (Poole, Barratt, Everest, Hogben, Newman).

Les résultats sont très bien confirmés par l'expérience tant que la pente des ondes formées n'est pas trop importante.

Ils peuvent être mis sous la forme suivante :

$$\frac{T_o}{G} = 4\,\pi_e\,\xi \qquad \text{avec : } \pi_e = \frac{p_c}{\rho_e . g . c} = \frac{G}{\rho_e . g . c . S} \qquad (2)$$

L'expression $\frac{G}{g . c . S} = \frac{M}{c . S}$ est appelée degré de pression.

La formule (2) montre que la pente de déjaugeage π_e augmente proportionnellement au degré de pression.

ξ coefficient numérique sans dimension a été calculé, en fonction du nombre de Froude $\mathcal{F}_e = \frac{V_e}{\sqrt{gc}}$, dans le cas d'un coussin à pression uniforme, pour différentes formes en plan de contours du coussin et pour différents allongements. Physiquement, en fonction de $\mathcal{F}_e$, et donc de la vitesse de l'aéroglisseur, la surface de l'eau se déforme : des ondes apparaissent dont la longueur d'onde augmente avec le nombre de Froude.

Au-dessus de ces ondes, l'aéroglisseur prend une assiette longitudinale différente de zéro. La traînée d'onde est donc en première approximation matérialisée par la composante horizontale du poids de l'appareil : quand la longueur d'onde est voisine du double de la longueur du coussin, l'assiette longitudinale est maximale à cabrer, la traînée d'onde maximale correspondante est appelée traînée de déjaugeage. Tout se passe comme si l'aéroglisseur évoluait sur une pente d'angle α tel que :

$$\text{tg}\alpha = 4\pi_e\xi \qquad (4)$$

La vitesse relative par rapport à l'eau correspondant à ce point est dite : vitesse de déjaugeage. Au-delà de cette vitesse, il y a toujours un creux derrière l'aéroglisseur mais la longueur d'onde de l'onde augmente ; ce creux recule donc de plus en plus par rapport à l'aéroglisseur. La diminution de la pente de l'onde entraîne celle de l'assiette de l'aéroglisseur qui finit par retrouver pratiquement l'assiette qu'il aurait sur une surface solide sensiblement horizontale (fig. I-15).

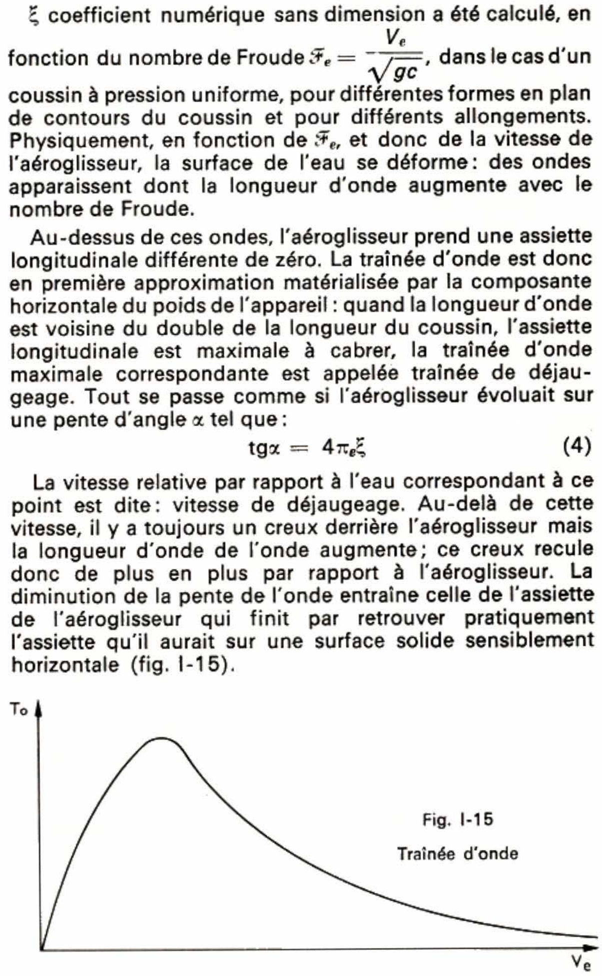


Fig. I-15

Traînée d'onde

Les courbes donnant ξ en fonction de $\mathcal{F}_e$ (V. fig. I-16) montrent que la traînée d'onde au déjaugeage diminue fortement avec l'allongement mais que, corrélativement, la vitesse de déjaugeage augmente.

Pour un allongement $\lambda = 2$, valeur voisine des allongements les plus souvent utilisés sur les machines actuelles le nombre de Froude du déjaugeage est voisin de 0,74 pour les formes en plan rectangulaire et de 0,70 pour les formes en

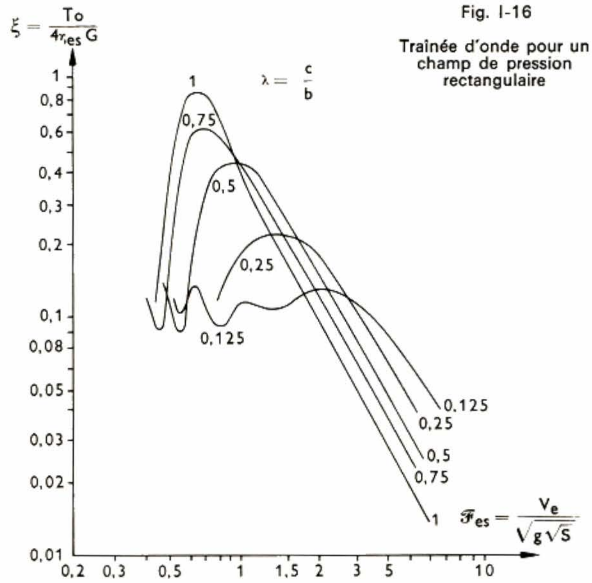


Fig. I-16

Traînée d'onde pour un champ de pression rectangulaire

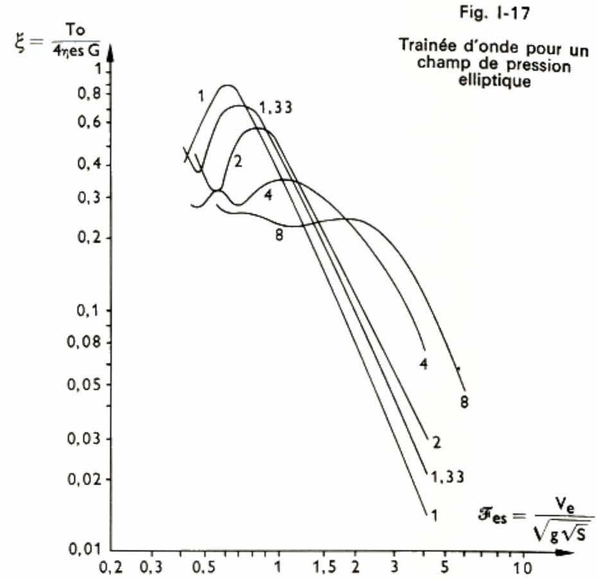


Fig. I-17

Traînée d'onde pour un champ de pression elliptique

plan elliptique (fig. I-17) ; le coefficient ξ est 0,42 pour les formes en plan rectangulaire et 0,55 pour les formes en plan elliptique.

La formule (2) peut s'écrire :

$$T_o = \frac{4\,\xi}{g\,\rho_e}\,\frac{G^2}{c\,.\,S} \qquad (5)$$

Cette expression montre que la traînée de déjaugeage croît comme le carré du poids de l'appareil et diminue quand la surface du coussin augmente.

Le coefficient ξ a été calculé en supposant que l'axe longitudinal du coussin est parallèle à la vitesse de l'appareil par rapport à l'eau, c'est-à-dire quand l'aéroglisseur vole sans dérive, ce qui n'est pas souvent le cas.

N. Hogben et J.T. Everest ont calculé le coefficient :

$$k = \frac{T_o\,\rho_e\,g}{p_c^2\,.\,b} \qquad (6)$$

Il est égal à 4 ξ pour des angles de dérive compris entre 0° et 90°.

La figure I-18 donne les résultats du calcul pour un rapport $\frac{S}{b}$ de 1,65. Les résultats ont été confirmés par l'expérience, tout au moins dans le domaine des faibles degrés, de pression.

Les valeurs de ξ données sur les courbes ont été calculées en supposant que la profondeur d'eau et la largeur du plan d'eau étaient illimitées. Si la deuxième hypothèse est pratiquement toujours vraie, ce n'est pas toujours le cas de la première. La théorie et les résultats expérimentaux montrent que ξ croît quand la profondeur d'eau est limitée.

La valeur maximale de ξ est atteinte pour une profondeur critique z_c telle que :

$$V_e = \sqrt{g z_c} \qquad (7)$$

En introduisant le nombre de Froude de déjaugeage $\mathcal{F}_d$ il vient :

$$z_c = \mathcal{F}_d^2 \sqrt{S} \qquad (8)$$

$\mathcal{F}_d$ étant voisin de 0,7, en introduisant l'allongement du coussin $\lambda = \frac{S}{b^2}$ nous obtenons :

$$\frac{z_c}{c} = \frac{1}{2\sqrt{\lambda}} \qquad (9)$$

C'est donc pour des profondeurs relatives z_c voisines de $\frac{1}{3}$ que la traînée de déjaugeage est maximale.

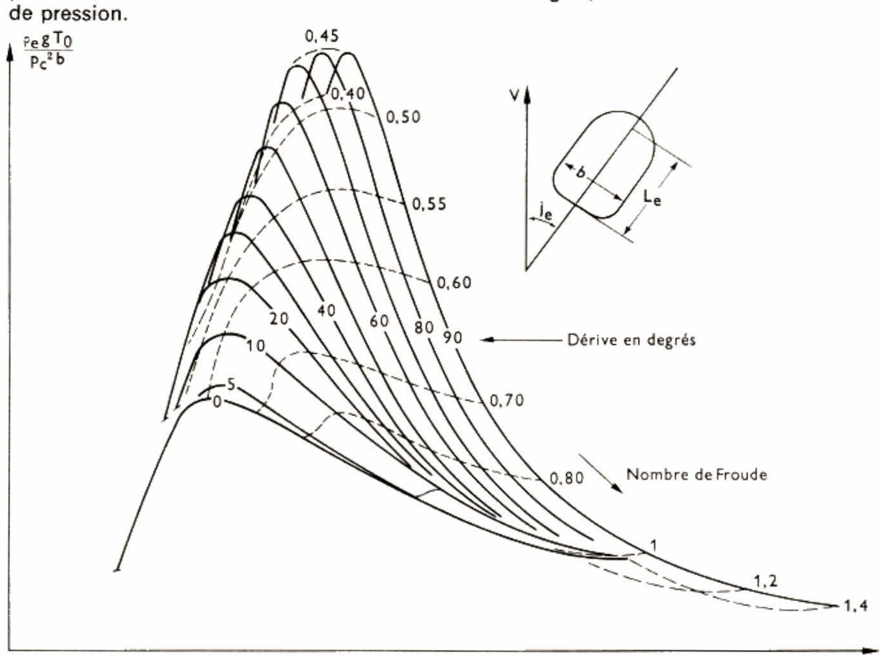


Fig. I-18

Variation de la traînée d'onde en eau profonde en fonction du nombre de Froude et de la dérive pour $\frac{L_e}{b} = 1,65$

Cette figure met en évidence l'intérêt de la forme en plan circulaire du coussin sous le rapport de la manœuvrabilité aux faibles vitesses

Certains essais ont montré, qu'à la profondeur critique, la traînée de déjaugeage pouvait être augmentée de 50 % par rapport à celle en profondeur illimitée. L'amplitude des ondes ne peut dépasser une certaine valeur sans que l'onde déferle ; l'assiette, donc la traînée d'onde, ne peut croître au-delà de la valeur où apparaît ce phénomène. Cette limitation de l'amplitude de l'onde peut aussi expliquer qu'à partir d'une certaine valeur de degré de pression la pente de l'onde (rapport de l'amplitude de l'onde à la longueur d'onde) ne peut croître sans que l'onde déferle. L'assiette de l'aéroglisseur, donc sa traînée de déjaugeage, ne peut plus croître.

4.4.2. Traînée de vague. — Il semble très difficile, sinon impossible, de calculer la traînée de vague T_v. Elle est en effet provoquée par les forces de frottement et les chocs d'origine hydrodynamique qui agissent sur les jupes et quelquefois sur la structure quand la mer est très agitée. En l'absence de vague ces actions n'existent pas. Une méthode de détermination de la traînée de vague consiste donc à mesurer la traînée d'un aéroglisseur, toutes choses égales d'ailleurs, au-dessus d'une surface d'eau calme puis agitée. La différence des deux traînées donne la traînée de vague. Ces essais peuvent être exécutés sur maquette dans un bassin des carènes et sur l'appareil en « vraie grandeur » au-dessus de la mer (dans ce dernier cas, les résultats ne sont connus qu'une fois l'appareil construit). L'exploitation des essais est complexe car un état de mer n'est décrit que statistiquement ; de plus, quand il y a des vagues, il y a aussi du vent. Il faut donc tenir compte de la variation de la traînée aérodynamique entre les deux essais pour obtenir une valeur exacte de la traînée de vague.

Au contraire, les essais sur maquettes au bassin des carènes permettent de connaître le bilan des traînées avant l'achèvement de la construction de l'appareil et donnent donc la possibilité de faire évoluer le prototype. L'absence de vent pendant ces essais et la régularité des vagues facilitent énormément le dépouillement. Le calcul de la traînée de vague de l'appareil réel s'effectue simplement en appliquant les lois de similitude. À partir d'un certain nombre d'essais, Ford et Chaplin ont donné une formule de la traînée de vague :

$$T_v = C_v \cdot \frac{\rho_e}{2} \cdot S \cdot V_e^2 \qquad (10)$$

avec :

$$C_v = 7{,}9\,10^{-3} \left(\frac{H_{1/3} - 2h}{c} \right)^{1,2} \qquad (11)$$

$H_{1/3}$ est la hauteur significative des vagues. C'est la moyenne du tiers des vagues les plus hautes enregistrées au cours d'une observation effectuée pendant un temps t voisin d'un quart d'heure.

C_v n'est jamais négatif ; il est nul si $H_{1/3} \leqslant 2h$. Il est bien évident que la traînée de vague dépend du type de jupes utilisées et de la forme du coussin ; l'expression n'est applicable en toute rigueur que pour les jupes essayées.

La formule (11), qui a le mérite d'être établie, soulève les questions suivantes :

— La longueur d'onde apparente de la houle que l'appareil rencontre n'y apparaît pas car les essais ont été effectués sur des vagues courtes ; or, sa valeur relative par rapport à la longueur du coussin est évidemment un paramètre essentiel.

— La vitesse par rapport à l'eau introduite dans la formule (10) est-elle bien la vitesse qui intervient dans le phénomène de traînée de vague ? Ne faut-il pas introduire comme terme correctif la projection de la vitesse de propagation de la houle V_h sur la vitesse de l'appareil :

$$V_h = \sqrt{\frac{g\Lambda}{2\pi}} = 1{,}25\sqrt{\Lambda}$$

et donc remplacer V_e^2 par $(V_e \pm V_h)^2$ quand les deux vitesses sont parallèles.

Au-delà des évolutions correspondant à l'effondrement de la partie avant du coussin et à l'écopage des jupes arrière, la formule n'est évidemment pas applicable ; mais à l'intérieur de ces limites l'assiette de l'appareil doit intervenir dans la formule.

4.4.3. Traînée d'embrun et traînée de jupe. — La comparaison à la même vitesse des traînées totales d'un aéroglisseur volant, toutes choses égales d'ailleurs, d'une part au-dessus d'une mer absolument calme et d'autre part au-dessus d'un sol horizontal lisse fait apparaître une différence qui est supérieure à la traînée d'onde. Cette traînée étant relativement bien connue, il faut admettre qu'un aéroglisseur qui se déplace au-dessus d'un plan d'eau parfaitement calme subit, en plus de la traînée d'onde, une traînée supplémentaire due à la nature fluide de la surface au-dessus de laquelle il vole.

Cette traînée est due à deux phénomènes très différents :

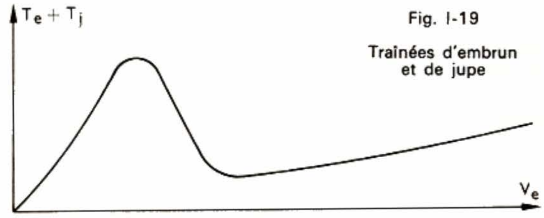
— Premièrement, aux embruns soulevés par l'afflux d'air du coussin et qui sont captés en partie par les jupes et la structure de l'aéroglisseur. L'accélération qui leur est communiquée est à l'origine d'une traînée de même nature que la traînée de captation dont il a été parlé précédemment ; c'est la traînée d'embrun T_e.

— Deuxièmement, au contact du bas des jupes avec le plan d'eau modifié localement par la présence du coussin. En particulier, pendant toute la période qui précède le déjaugeage, l'appareil entraîne avec lui son « trou » dont les parois fluides se déforment en présence des jupes et créent des forces de frottement : c'est la traînée de jupe T_j.

La variation de ces traînées avec la vitesse ne permet pas de définir un coefficient de traînée constant, analogue aux coefficients aérodynamiques.

Ces traînées croissent rapidement pendant toute la période précédant le déjaugeage. Elles sont maximales au voisinage du déjaugeage, puis elles diminuent car l'immersion de l'appareil diminue et le « trou » tend à disparaître. Elles passent par un minimum et augmentent ensuite un peu moins vite que le carré de la vitesse (fig. I-19). Les principaux paramètres susceptibles d'agir sur ces traînées sont :

Fig. I-19

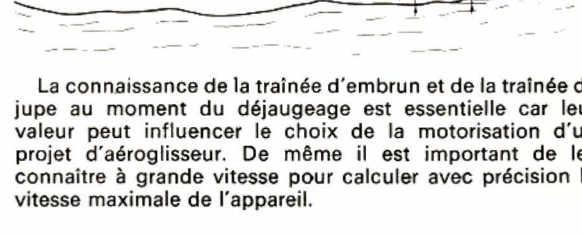


Traînées d'embrun et de jupe

— l'immersion i qui d'ailleurs varie continûment depuis le vol stationnaire ($i = e - h$) jusqu'à grande vitesse lorsque l'aéroglisseur vole à une hauteur h au-dessus du plan d'eau (fig. I-20) ;
— la largeur du coussin ;
— l'allongement du coussin ;
— la pression du coussin et sa distribution ;
— le type de jupe.

Ces deux derniers paramètres interviennent pour la plus grande part dans les performances et la manœuvrabilité de l'aéroglisseur marin.

Fig. I-20



Enfoncement
Immersion
$i = e - h$

La connaissance de la traînée d'embrun et de la traînée de jupe au moment du déjaugeage est essentielle car leur valeur peut influencer le choix de la motorisation d'un projet d'aéroglisseur. De même il est important de les connaître à grande vitesse pour calculer avec précision la vitesse maximale de l'appareil.

4.5. Bilan des traînées. — La traînée totale d'un aéroglisseur qui se déplace au-dessus de l'eau se décompose en un certain nombre de termes qui ont été analysés dans les paragraphes précédents :

$$T_t = T_a + T_c + T_o + (T_e + T_j) + T_v$$

La figure I-21 donne l'évolution des différentes traînées élémentaires en fonction de la vitesse.

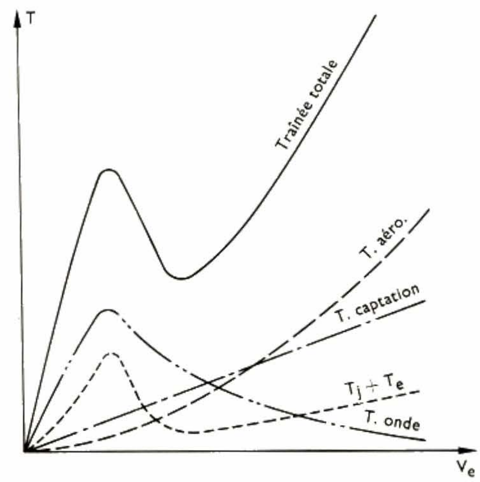


Fig. I-21

Bilan des traînées

La traînée aérodynamique $T_a = C_x \frac{\rho_a}{2} SV_a^2$ et la traînée de captation $T_c = qV_a$ varient avec la vitesse par rapport à l'air tandis que la traînée de vague $T_v = C_v \frac{\rho_e}{2} SV_e^2$ et les traînées d'onde, d'embrun et de jupe sont liées à la vitesse par rapport à l'eau.

Pour obtenir les vitesses maximales d'un aéroglisseur pour différentes conditions de vol il suffit de tracer, sur un même graphique, les courbes donnant la traînée totale et la force propulsive en fonction de la vitesse par rapport à la surface (fig. I-22). Les points d'intersection de deux courbes correspondantes, qui expriment l'égalité de la poussée et de la traînée, donnent les vitesses maximales théoriques. Ces vitesses ne tiennent pas compte des limitations telles que résistance et fatigue de la structure, comportement des jupes, confort des passagers, etc, qui ne permettent pas de les atteindre en toutes circonstances.

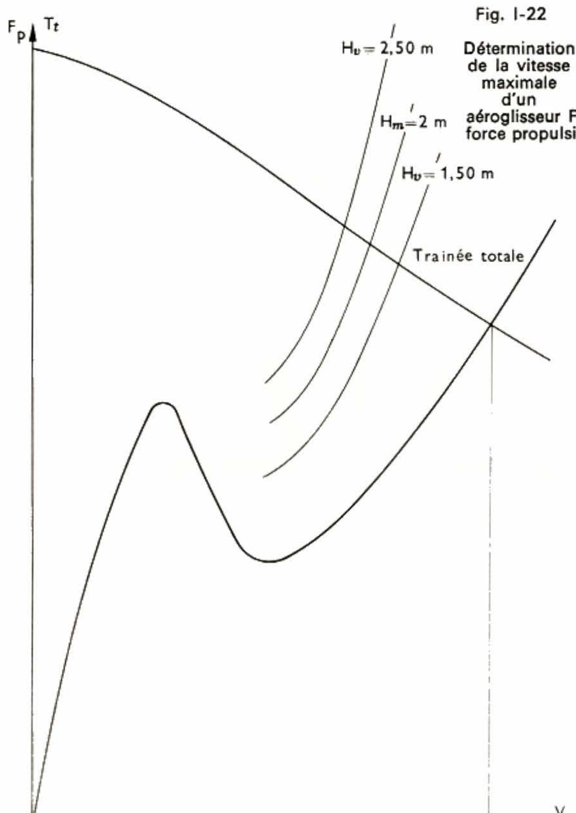


Fig. I-22

Détermination de la vitesse maximale d'un aéroglisseur Fp : force propulsive

4.6. Bilan de puissance. — La connaissance de toutes les traînées, dans les différentes conditions de vol imposées par les spécifications techniques, est indispensable au calcul de la puissance totale nécessaire pour atteindre les vitesses maximales correspondantes.

La puissance totale considérée ici est la somme des puissances de propulsion et de sustentation que doit fournir le groupe moteur de l'aéroglisseur, c'est-à-dire compte tenu des différents rendements qui interviennent entre les puissances nettes et les puissances motrices.

4.7. Stabilité statique

4.7.1. Raideur en pilonnement. — Considérons un aéroglisseur dont le centrage des masses est tel qu'en vol stationnaire au-dessus d'un sol horizontal son assiette soit horizontale. Lorsque le générateur d'air de sustentation est mis en route, l'appareil se soulève d'une hauteur h dite hauteur de vol. Sans toucher aux caractéristiques du générateur et sans déplacer son centre de gravité, modifions sa masse. La hauteur de vol varie. La courbe ci-après (fig. I-23) donne l'allure de cette variation. La pente de la courbe en un point G_o, h_o donne la raideur en pilonnement de l'appareil.

$$K_1 = \frac{dG}{dh}$$

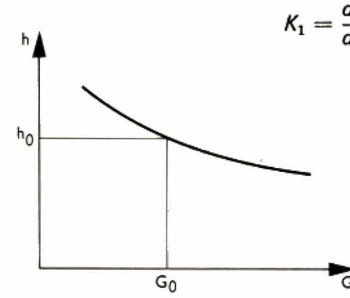


Fig. I-23

Raideur en pilonnement

Cette raideur est négative. C'est-à-dire qu'à un accroissement de la masse correspond une diminution de la hauteur de vol.

La raideur en pilonnement est très grande en valeur absolue : elle est voisine de 10 000 N/cm.

Il lui correspond une fréquence de pilonnement :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{|K_1|}{M}}$$

Dans le cas d'un coussin d'air simple cloche il est possible de calculer K_1 en fonction des caractéristiques du coussin et de son alimentation en admettant que les jupes sont indéformables :

$$K_1 = \frac{G}{h}\left[\frac{p_c}{qf'(q)} - \frac{1}{2}\right]^{-1}$$

Dans cette relation $f'(q)$ représente la dérivée par rapport à q de l'équation caractéristique donnant la pression du coussin p_c en fonction du débit en masse q de l'air (les débits de l'air entrant et de l'air sortant sont supposés égaux) (fig. I-24).

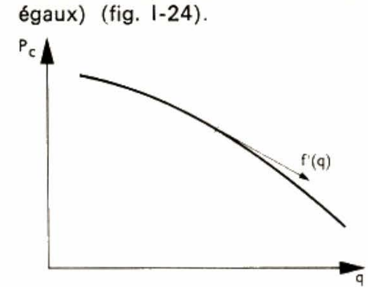


Fig. I-24

Caractéristique de l'alimentation du coussin

Le même résultat serait obtenu en supposant l'air incompressible. En première approximation (c'est-à-dire

sans tenir compte du terme correctif que constitue la parenthèse) la valeur absolue de K_1 est :

— proportionnelle au poids de l'aéroglisseur ;
— inversement proportionnelle à sa hauteur de vol.

En introduisant le coefficient de raideur sans dimension :

$$C_{K_1} = \frac{dG}{G} : \frac{dh}{h} = \frac{dG}{dh}\frac{h}{G} = K_1 \frac{h}{G}$$

nous obtenons :

$$C_{K_1} = \left(\frac{p_c}{qf'(q)} - \frac{1}{2}\right)^{-1}$$

$|C_{K_1}|$ est toujours compris entre 2 et 0. En effet, quand le débit en masse de l'air est très grand, la caractéristique pression-débit en masse montre que $|f'(q)|$ est grand et p_c petit. Le premier terme de la parenthèse devient très petit et $|C_{K_1}|$ tend vers 2. Pour augmenter $|C_{K_1}|$ il faut donc accroître les dimensions du coussin.

Pour un appareil et un coussin d'air déterminés, p_c est imposé et q ne peut varier que très peu ; le seul paramètre sur lequel il est donc possible d'agir pour modifier la raideur en pilonnement, est la pente de la caractéristique. La raideur est forte en choisissant le point de fonctionnement vers les grands débits et en demandant au générateur d'air une forte pression aux faibles débits. Cette dernière exigence est d'ailleurs nécessaire pour faciliter la mise en sustentation de l'appareil. Il est généralement admis d'avoir une pression à débit nul supérieure ou égale à deux fois la pression du coussin.

4.7.2. Raideur pneumatique en pilonnement. — Avant de dire quelques mots sur les raideurs en tangage et en roulis, il faut introduire la notion de raideur pneumatique qui va permettre de simplifier considérablement l'écriture des conclusions de l'étude de la stabilité dynamique d'une plate-forme équipée d'un coussin du type cloche.

Par définition, la raideur pneumatique est le rapport $\frac{dG}{dh}$ d'un ensemble piston-cylindre caractérisé par un poids du piston égal au poids de la plate-forme G, par une surface du piston égale à la surface du coussin S, par un volume du cylindre sous le piston égal au volume sous la plate-forme $S.H$ (fig. I-25).

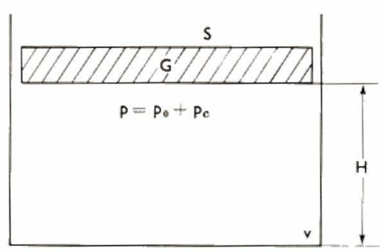


Fig. I-25
Raideur pneumatique en pilonnement

En supposant la paroi du cylindre indéformable, nous pouvons écrire les équations suivantes :

$$v = S.H$$
$$G = S(p - p_0)$$
$$pv^{\gamma} = \text{Cte}$$

En différentiant, il vient :

$$dv = S.dH$$
$$dG = S.dp$$
$$\frac{dp}{p} + \gamma\frac{dv}{v} = 0$$

En éliminant dp et dv et en notant que la variation dH est égale à dh, variation de la hauteur de vol, nous obtenons :

$$\frac{dG}{dh} = \frac{dG}{dH} = -S^2\frac{\gamma p}{v} = K_2$$

De la même façon il est possible de calculer la raideur pneumatique en supposant que la paroi du cylindre se déforme sous l'action de la variation de la pression interne.

Dans ce cas, la variation de volume est donnée par l'équation suivante :

$$dv = S\,d\,h + \frac{\delta v}{\delta p}dp$$

d'où :

$$\frac{dG}{dh} = -\frac{S^2}{\frac{v}{\gamma p} + \frac{\delta v}{\delta p}} = K_{2d}$$

4.7.3. Raideur en tangage. — L'obtention d'une raideur longitudinale est possible par le fractionnement du coussin en un certain nombre d'enceintes distinctes dont les alimentations sont partiellement ou totalement séparées. La raideur est d'autant plus grande que les interactions entre les différentes enceintes sont plus faibles. Si, pour des raisons de simplicité, l'alimentation est commune à plusieurs enceintes, il est nécessaire de freiner les intercommunications en provoquant des pertes de charge suffisantes (ces pertes interviennent également sur l'amortissement des mouvements de tangage).

Considérons le même aéroglisseur que ci-dessus, en vol stationnaire horizontal au-dessus d'un plan uni et horizontal. À masse constante, déplaçons son centre de gravité le long de l'axe longitudinal de l'appareil sans modifier les caractéristiques du générateur. L'assiette n'est plus horizontale ; l'appareil pique ou cabre selon que le centre de gravité avance ou recule (fig. I-26).

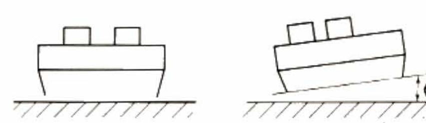


Fig. I-26 — Variation de l'assiette en fonction du centrage

Soit Θ l'angle de l'axe longitudinal avec l'horizontale. La courbe de la figure I-27 donne l'allure de la variation du centrage C (ou du moment correspondant) en fonction de Θ. Pour chaque position du centre de gravité, l'appareil est en équilibre stable.

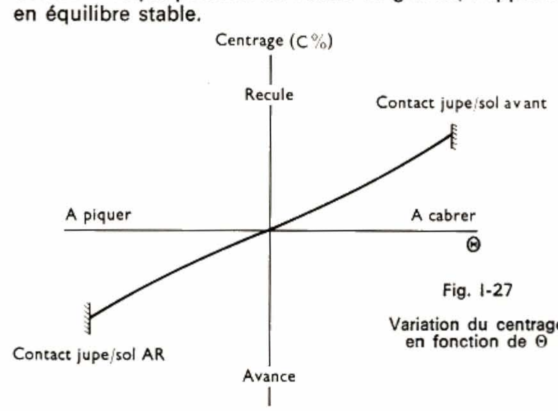


Fig. I-27
Variation du centrage en fonction de Θ

Pour empêcher l'appareil de se déplacer sous l'influence de la réaction de jet qui apparaît il faut le fixer par un dispositif n'introduisant aucun moment de tangage.

Le moment de décentrage appliqué en déplaçant le centre de gravité de l'aéroglisseur est équilibré par les moments de rappel créés par le coussin d'air. Ces moments ont deux origines :

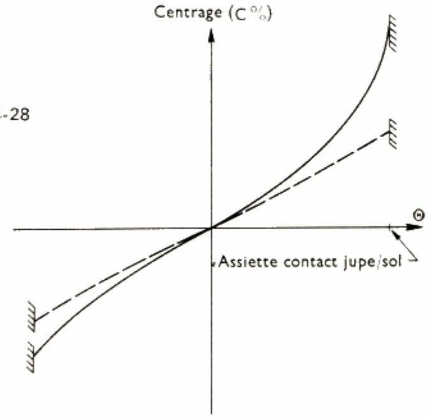
— la nouvelle répartition des pressions statiques dans les différentes enceintes du coussin ;
— la réaction de jet.

La pente de la courbe en un point (Θ_0, C_0) donne la raideur en tangage de l'appareil :

$$K_{\Theta} = \frac{dC}{d\Theta} \qquad (17)$$

Elle est généralement exprimée en centièmes de la longueur du coussin par degré d'inclinaison. Avec les conventions de signe indiquées sur la figure elle est positive. Elle varie de 1 à 7 %. Suivant le type de coussin la raideur en tangage K_{Θ} peut être pratiquement constante jusqu'au contact jupe-sol ou, au contraire variable avec l'assiette.

Fig. I-28



Dans ce cas, elle est en général minimale au voisinage de l'assiette horizontale et maximale aux deux extrémités de la courbe (contact jupe-sol) (fig. I-28).

4.7.4. Raideur en roulis. — Tout ce qui a été écrit dans le paragraphe précédent s'applique ici. Il suffit de remplacer longitudinal par transversal; piquer ou cabrer par gîte bâbord ou tribord; avance ou recule par se déplace vers la gauche ou vers la droite; Θ par Φ; tangage par roulis; etc.

La raideur en roulis des appareils de forme allongée est normalement inférieure à la raideur en tangage.

4.8. Stabilité dynamique en pilonnement. — L'analyse des stabilités dynamiques en tangage et en roulis fait appel aux mêmes hypothèses et aux mêmes principes pour la mise en équation des petits mouvements. Mais la formulation beaucoup plus complexe doit être effectuée dans chaque cas particulier et dépasse nettement le cadre de ce paragraphe (fig. I-29).

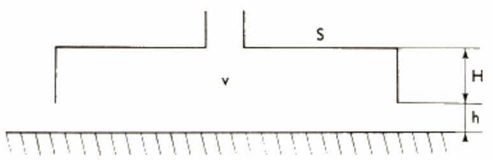


Fig. I-29 — Stabilité dynamique en pilonnement d'un coussin à cloche

Dans le cas simple d'une cloche indéformable on démontre que la valeur absolue de la raideur pneumatique $|K_2|$ doit être supérieure à celle de la raideur propre $|K_1|$ pour que la plate-forme soit stable en pilonnement.

Dans le cas où la paroi de la cloche est déformable, la condition de stabilité des petits mouvements en pilonnement de la plate-forme s'écrit:

$$|K_{2d}| > |K_1|$$

La condition de stabilité des petits mouvements en pilonnement établie pour une plate-forme à cloche peut également être utilisée, en première approximation, pour les autres types de coussin.

4.9. Mécanique du vol. Performances

4.9.1. Mécanique du vol. — L'étude théorique complète de la mécanique du vol d'un aéroglisseur n'en est qu'à ses débuts car les phénomènes qui interviennent sont très nombreux et très complexes.

Quoique l'interface eau-air, sur laquelle évolue un aéroglisseur soit en moyenne horizontale, elle est très perturbée par la présence pratiquement constante d'une houle, définie par sa longueur d'onde et son creux significatif $H_{\frac{1}{3}}$. Les jupes idéales suivant sans aucun déphasage les déformations de cette interface n'existent pas; il en résulte que la hauteur moyenne de vol, le débit de fuite au bas des jupes et les pressions dans les différentes enceintes du coussin d'air ne sont pas constants.

L'aéroglisseur en vol rectiligne uniforme subit des accélérations verticales de pilonnement et des accélérations angulaires de tangage et de roulis. Sous l'influence des mouvements résultants, les jupes, malgré une certaine souplesse, entrent en contact avec l'eau. Les forces hydrodynamiques qui en résultent agissent alors sur le mouvement de l'aéroglisseur; leurs effets doivent pouvoir être annulés par des forces aérodynamiques ou hydrodynamiques sous la dépendance du pilote s'ils sont susceptibles de mettre l'appareil dans une situation dangereuse pour la sécurité.

Pour analyser correctement le comportement en vol d'un aéroglisseur il est donc indispensable de tenir compte de ces contacts qui mettent en jeu des forces importantes. Pour ce faire il faut connaître à chaque instant la position du bas de toutes les jupes par rapport à la surface de l'eau. Cela met en cause l'assiette de l'appareil, la répartition de pression dans les jupes, leur déformation, etc.

Malgré toutes ces difficultés nous donnerons ci-dessous quelques résultats expérimentaux permettant au lecteur de saisir l'entière complexité de la mécanique du vol des aéroglisseurs.

4.9.2. Performances. — La figure I-30 qui donne en fonction de la vitesse par rapport à l'eau la force propulsive de l'aéroglisseur et sa traînée totale, fait ressortir les points suivants:

La traînée totale au déjaugeage est la somme des traînées d'onde, de jupe et d'embrun, de captation aérodynamique et de vague qui dépend de l'état du plan d'eau. Cette

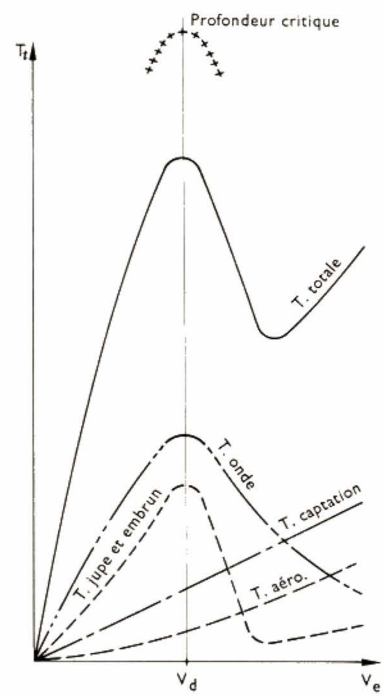


Fig. I-30

Répartition des traînées

figure montre que la traînée totale de déjaugeage augmente quand la profondeur du plan d'eau dans la zone de déjaugeage est égale à la profondeur critique (+ 25 %).

Si l'appareil doit déjauger face au vent, la traînée aérodynamique et la traînée de captation augmentent; si de plus l'eau est agitée, il faut tenir compte aussi de la traînée de vagues.

Sur un appareil allongé, la traînée d'onde augmente considérablement avec la dérive; il est donc très intéressant de déjauger avec une dérive nulle. Dans ce cas, s'il y a du vent, l'appareil doit voler sensiblement en ligne droite avec dérapage aérodynamique. Le pilote doit alors disposer de gouvernes permettant de créer un couple et une force respectivement égaux et opposés au couple et à la force aérodynamique dus au dérapage.

Par mer calme, l'évolution de l'assiette est sensible pendant la période de déjaugeage; au moment du déjaugeage,

l'appareil « salue » (fig. I-31). Quel que soit l'état de la mer, la réduction des embruns (projection d'eau sur le pare-brise) indique au pilote que l'appareil est déjaugé.

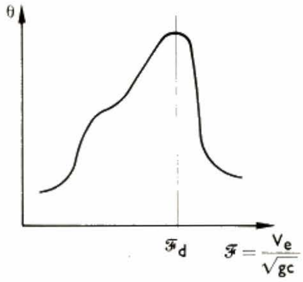


Fig. I-31

Variation de l'assiette pendant le déjaugeage

En dehors des phases de vol qui correspondent à la sortie de l'escale, à l'entrée et aux évolutions dans l'escale, l'aéroglisseur vole toujours en ligne droite. Les vitesses stabilisées maximales qu'il peut atteindre pour différents états de mer et de vent sont importantes à connaître avec précision car de ces valeurs dépendent les vitesses de croisière, donc les vitesses de service pour une traversée déterminée. Ces dernières interviennent directement dans le calcul du prix de revient de la tonne par kilomètre ou du passager par kilomètre.

L'intersection des courbes de traînées avec la courbe de poussée donne la valeur des vitesses maximales qui pourraient être obtenues si aucune autre limitation n'intervenait au cours des vols. C'est d'ailleurs un des buts primordiaux des fabricants d'aéroglisseurs que de concevoir des appareils qui pourraient effectivement atteindre ces vitesses maximales. C'est un problème difficile car de nombreux phénomènes interviennent pour empêcher de les atteindre. Nous allons donner quelques indications sur les plus importants.

1° *Phénomènes aérodynamiques et hydrodynamiques.* — Précédemment nous avons signalé l'existence d'une portance et d'un moment cabreur aérodynamiques qui varient comme le carré de la vitesse. Au voisinage des vitesses maximales ils sont très importants et modifient les conditions d'équilibre de l'aéroglisseur. La portance réduit la pression moyenne dans le coussin.

Compte tenu de la caractéristique d'alimentation du coussin d'air, le débit augmente donc la hauteur de vol mais aussi la traînée de captation. Si la traînée de captation augmente plus vite que ne diminue la traînée de vague, la vitesse maximale est réduite. En général, cette influence de la portance aérodynamique est prise en considération dans le calcul des différentes traînées et les courbes de la figure tiennent compte de son existence.

Le rôle du moment cabreur est beaucoup plus complexe car il fait intervenir les propriétés du coussin et son comportement sur les différents états de mer. Sous l'action de ce moment cabreur l'assiette de l'aéroglisseur est modifiée et pour une certaine vitesse, compte tenu de la raideur du coussin sur l'eau, l'appareil peut cabrer suffisamment pour que les jupes arrières prennent contact avec l'eau. Suivant la conception du coussin ce contact est à l'origine :

— d'une augmentation de la traînée hydrodynamique et alors la vitesse maximale prévue n'est pas atteinte ;

— d'un moment piqueur qui excite des oscillations de tangage, réduisant le confort des passagers et pouvant même entraîner un contact brutal des jupes avant ou même de la structure avec l'eau (d'où des contraintes importantes et des possibilités de rupture de certains éléments de la structure) ;

— de moments de lacet aléatoires créés par le contact des jupes latérales arrières.

Ces moments sont le plus souvent difficilement contrôlables. Les dérapages et dérives importantes qu'ils induisent peuvent mettre l'appareil en difficulté. Pour reculer ces limitations de vitesse et permettre à l'aéroglisseur d'atteindre les vitesses théoriques, il faut pouvoir modifier en vol l'assiette de l'aéroglisseur afin d'éviter ces contacts. Cela est possible soit par ballastage, soit par déplacement du centre de poussée, soit par la création d'un moment piqueur aérodynamique, soit, aussi, par une architecture générale qui permet de réduire suffisamment le moment cabreur (procédés A. Grihangne). Ces moyens ne sont pas équivalents. Le ballastage est un procédé relativement lent, le déplacement du centre de poussée par modification de la répartition du débit d'alimentation du coussin d'air est très rapide. Le moment piqueur peut être créé par une voilure située soit à l'avant de l'appareil (incidence négative et portance globale réduite) soit à l'arrière (incidence positive et portance globale augmentée). Compte tenu du moment cabreur à équilibrer, la surface d'une telle voilure peut être prohibitive. Il est possible d'augmenter son efficacité en la plaçant dans le souffle des hélices au détriment d'une légère perte de poussée.

Si le choix de l'assiette optimale est possible, les vitesses maximales correspondant aux différents états de mer sont alors limitées par le confort des passagers et la tenue des structures rigides et souples.

2° *Confort des passagers.* — Le groupe de travail n° 7 du Comité technique 108 (Vibrations mécaniques et chocs de l'ISO) donne les moyennes quadratiques des accélérations susceptibles d'être supportées par les passagers pendant des durées différentes (fig. I-32).

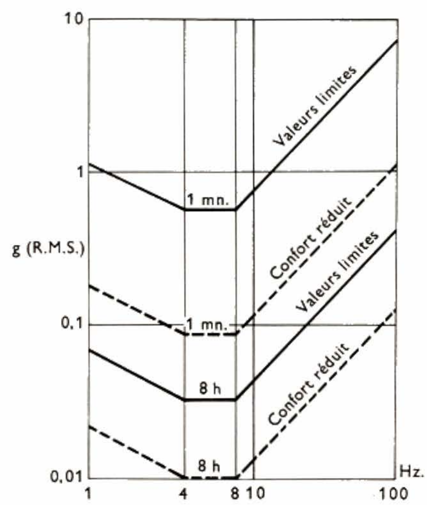


Fig. I-32

Propositions ISO

La figure ci-dessus montre que pour les aéroglisseurs dont les fréquences se situent entre 0,5 et 3 à 4 Hz la moyenne quadratique pour un trajet d'une heure ne doit pas dépasser 2 m/s². Ce n'est pas toujours le cas et c'est le plus souvent cette limitation qui empêche le pilote de l'aéroglisseur d'atteindre les vitesses théoriques.

3° *Tenue des structures.* — Les normes de calcul des structures tiennent évidemment compte des accélérations qu'elles subissent. Ces accélérations, pour un état de mer déterminé, dépendent du coefficient d'atténuation produit par le coussin d'air et les jupes. La valeur de ce coefficient n'est pas connue avec précision ; pour s'assurer de la tenue de la structure il est donc nécessaire de mesurer un certain nombre de contraintes dans les zones où elles sont maximales. La vitesse limite est celle pour laquelle ces contraintes dépassent les valeurs correspondant à la limite en fatigue des matériaux utilisés.

4° *Arrêts.* — La facilité de freinage, caractérisée par une courte distance d'arrêt, est une qualité que doit posséder l'aéroglisseur pour éviter, en toute sécurité, un obstacle surgissant à l'improviste et pour perdre le minimum de temps au cours de l'approche (ce qui entraîne une amélioration de la vitesse de service).

Quelle que soit la façon dont est assurée la propulsion d'un aéroglisseur, le dispositif utilisé (hélice aérienne ou marine, jet d'air ou d'eau, etc.) permet au pilote d'inverser plus ou moins rapidement la poussée. Cette possibilité permet d'effectuer un arrêt dit normal.

Très souvent, la valeur de la poussée en inverse n'est pas très grande et il est nécessaire de réduire la distance d'arrêt par une procédure plus compliquée mais ne mettant pas en danger les passagers et la structure.

Cette procédure consiste à réduire plus ou moins la hauteur de vol à partir d'une certaine vitesse obtenue par inversion de la poussée. Suivant le type de coussin et l'état de la mer cette vitesse peut varier entre 40 et 80 km/h.

En cas de nécessité absolue, pour éviter une catastrophe, un arrêt d'urgence peut être effectué en coupant d'un seul coup la sustentation quelle que soit la vitesse. Dans ce cas, la décélération peut nettement dépasser g(9,8 m/s²) et l'arrêt peut s'accompagner de quelques dommages à la structure.

Le changement de sens de la poussée crée, dans tous les cas où l'axe de poussée ne passe pas par le centre de gravité de l'aéroglisseur, une modification importante de son assiette ; cela peut entraîner un effondrement de l'avant du coussin ou une augmentation de la traînée hydrodynamique des jupes arrière. Dans ces conditions le comportement de l'aéroglisseur dépend du type de coussin utilisé.

5° *Girations.* — En simplifiant énormément les conditions d'équilibre, un aéroglisseur qui décrit une trajectoire circulaire à vitesse V_a et dérapage j_a constants, par mer calme et vent nul, est soumis à deux forces égales passant par le centre de gravité et normales à la trajectoire (fig. I-33).

$$M\frac{V_a^2}{R} = P \sin j_a$$

d'où :

$$R = \frac{MV_a^2}{P \sin j_a}$$

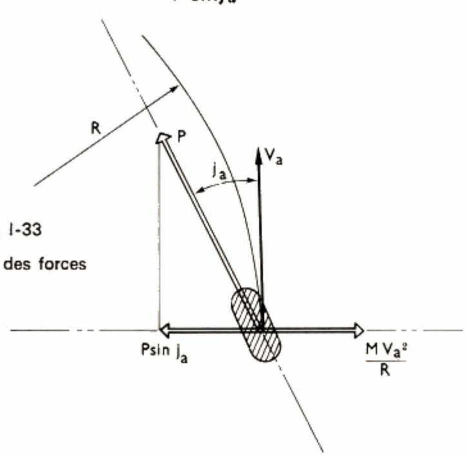


Fig. I-33

Équilibre des forces

Pour un appareil de masse donnée le rayon de giration augmente comme le carré de la vitesse et est inversement proportionnel à la force propulsive et au sinus de l'angle de dérapage. Si la vitesse de vol en giration est fixée, la poussée est imposée et le seul paramètre pour agir sur le rayon de giration est le dérapage. Pour mettre l'appareil en dérapage constant, le pilote doit disposer de moyens appropriés et efficaces qui engendrent des couples de lacet.

Le dérapage maximal que peut prendre l'appareil est limité (donc aussi la plus faible valeur du rayon de giration) par un phénomène qui combine des effets aéro et hydrodynamiques. Sous l'influence du dérapage il apparaît un couple de roulis qui incline généralement l'appareil vers l'intérieur du virage. Cette inclinaison est favorable à la mise en giration par la réaction de jet ainsi créée, dirigée vers l'intérieur du virage. Quand le moment de roulis atteint et dépasse la valeur correspondant au contact jupes-eau, la traînée hydrodynamique côté intérieur au virage crée un couple de lacet qui a tendance en général à augmenter le dérapage donc à serrer le virage.

C'est pourquoi, pour réduire le rayon de giration par mer calme et vent nul, il est nécessaire de piloter l'appareil en maintenant constamment le dérapage à la limite maximale admissible. C'est d'ailleurs la seule procédure utilisée pour virer quand il y a du creux et du vent si l'on veut virer à vitesse constante par rapport au sol.

5. LES AÉROGLISSEURS MARINS À QUILLES LATÉRALES (A.Q.L.)

Avant d'aborder l'étude des A.S.A.S.-A.Q.L. il est nécessaire de dire quelques mots des A.S.A.S.-A.J.S. semi-amphibies qui constituent la transition entre les A.J.S. amphibies et les A.Q.L. non amphibies.

5.1. Aéroglisseurs à jupes souples semi-amphibies. — Ils se distinguent des A.J.S. amphibies uniquement par le fait que la propulsion n'est plus aérienne mais marine. La force propulsive est alors indépendante de la vitesse du vent. Cette propulsion marine peut être assurée soit par une ou plusieurs hélices marines, soit par un jet d'eau ; dans les deux cas des éléments de l'aéroglisseur s'enfoncent obligatoirement dans l'eau, lui enlevant ainsi son caractère amphibie mais lui permettant de venir s'échouer sur une plage ou un *slip* (fig. I-34).

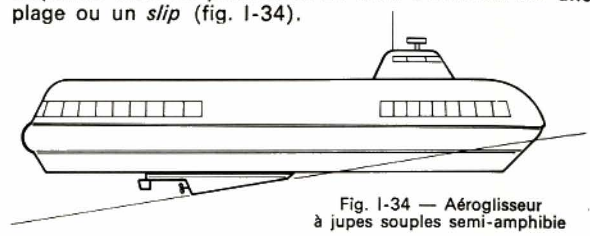


Fig. I-34 — Aéroglisseur à jupes souples semi-amphibie

5.2. Aéroglisseurs à quilles latérales. — Les A.Q.L. sont des aéroglisseurs non amphibies. À l'arrêt ils ont d'ailleurs un tirant d'eau qui peut être relativement important (fig. I-35).

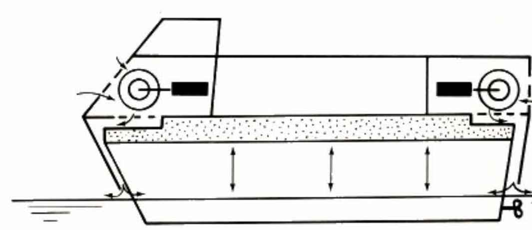


Fig. I-35 — Aéroglisseur à quilles latérales

5.2.1. Parties constitutives. — Comme leur nom l'indique (A.Q.L.), les jupes souples latérales qui ferment le coussin d'air sont remplacées par des parois rigides qui s'enfoncent plus ou moins dans la mer.

À l'avant et à l'arrière la fermeture du coussin est obtenue soit par des éléments souples, soit par des éléments articulés ou semi-rigides. La propulsion est assurée, comme pour les semi-amphibies, soit par des hélices marines, soit par jet d'eau. Le débit d'air de sustentation est plus faible et permet, sans nécessiter une grande puissance de sustentation, de fonctionner avec une pression de coussin importante ; cela permet de réduire les dimensions de l'appareil.

À partir d'un certain tonnage, la motorisation ne se distingue pas de celle des A.J.S. Les organes de commande sont marins et non aériens (pas différentiel des hélices, variation de régime des propulseurs, gouvernail de direction, orientation et inversion de jet, etc.).

5.2.2. Coussin d'air. — La présence des quilles latérales modifie les fonctions du coussin d'air.

Sur un A.J.S., le coussin d'air joue trois rôles essentiels ; il assure :

— la sustentation de l'aéroglisseur à une hauteur h au-dessus du plan d'eau ;

— les rappels en pilonnement, tangage et roulis et les stabilités associées ;

— le déplacement à basse vitesse par l'éjection contrôlée des fuites d'air au bas de la jupe périphérique.

Dans le cas des A.Q.L. une partie plus ou moins grande de la sustentation peut être prise en charge par les quilles latérales dont le volume immergé et la forme déterminent les portances correspondantes.

Suivant le profil donné à la section des quilles, leur participation aux raideurs en pilonnement, tangage et roulis est plus ou moins importante. À la limite il est donc possible de ne pas cloisonner le coussin d'air et d'assurer la stabilité complète de l'aéroglisseur en pilonnement, tangage et roulis uniquement par les variations de portance des quilles en fonction du mouvement de l'aéroglisseur. Le coussin d'air et son alimentation sont alors extrêmement simplifiés. Le maintien des parties souples à l'avant et à l'arrière permet éventuellement, en soulevant les jupes, de faire varier les débits de quantité de mouvement et de déplacer à basse vitesse, l'aéroglisseur vers l'avant et vers l'arrière.

5.2.3. Bilan des traînées. — Toutes choses égales d'ailleurs, la traînée aérodynamique d'un A.Q.L. est plus faible que celle d'un A.J.S. car la présence des quilles permet d'avoir:

— un débit de fuite plus faible, donc une traînée de captation réduite;

— à égalité de puissance de sustentation, une puissance p_c plus grande, donc des dimensions réduites.

La décomposition de la traînée hydrodynamique est différente de celle qui a été admise pour les A.J.S. La traînée d'onde est la somme de la traînée d'onde du coussin donnée par:

$$T_{oc} = 4\,\pi e \xi G \text{ identique à celle des A.J.S.}$$

et de la traînée d'onde secondaire des quilles donnée par:

$$T_{oq} = k_1 \xi \frac{M}{c} V_e^2$$

avec:

$$k_1 = 2 \frac{C_1}{c} \frac{C_1}{b} C_f$$

C_1: longueur mouillée des quilles;
C_f: coefficient de frottement donné par la formule de Schoenherr:

$$C_f = (3{,}46 \lg \mathcal{R} - 5{,}6)^{-2}$$

majoré pour tenir compte de l'état de surface ($+ 5.10^{-4}$).

La traînée de vague est la somme de deux termes. Le premier, dû au frottement de l'eau sur les fermetures avant et arrière, a pour expression:

$$T_{vf} = k_2 \left(\frac{H - 2\,h}{c}\right)^{1{,}2} \rho_e\, S\, V_e^2$$

avec: $k_2 = 1{,}975 . 10^{-3}$

Le deuxième, dû au frottement de l'eau sur les parois immergées mouillées des deux côtés, est égal à:

$$T_{vq} = k_3 \rho_e\, S V_e^2$$

avec:

$$k_3 = n \frac{C_1}{c} \frac{h_1}{b} C_f$$

h_1: hauteur moyenne mouillée des quilles.

La traînée d'embrun due aux quilles est donnée par:

$$T_{eq} = 0{,}15 \frac{e^2}{S} \rho_e\, V^2_e$$

e: épaisseur moyenne des quilles immergées.

À toutes ces traînées il faut encore ajouter la traînée d'embrun et la traînée de jupe (déjà considérées pour les A.J.S. par mer calme). La valeur de ces deux traînées n'est pas connue avec suffisamment de précision pour qu'il soit possible d'en donner les expressions.

La comparaison des traînées des A.Q.L. et des A.J.S. montre qu'à égalité de vitesse la traînée d'un A.Q.L. est généralement supérieure à celle d'un A.J.S. du fait des traînées dues aux quilles. Il faut préciser que les deux types d'aéroglisseurs ont des conditions de fonctionnement optimales dans des domaines de vitesses différents. Les A.Q.L. sont adaptés à des nombres de Froude compris entre 1,2 et 1,8 tandis que les A.J.S. ont leur rendement de transport maximal à des nombres de Froude compris entre 1,5 et 2,5.

5.2.4. Mécanique du vol. — La stabilité en lacet d'un A.Q.L. est nettement supérieure à celle d'un A.J.S. car, par un dessin correct des quilles ou par des dérives marines, il est possible de lui donner un moment de rappel hydrodynamique relativement important. Contrairement à ce qui se passe avec un A.J.S., cette stabilité n'est pas défavorable à faible vitesse par rapport à l'eau, même par fort vent arrière, car la vitesse par rapport à l'eau ne change pas de signe (contrairement à la vitesse aérodynamique).

Les gouvernes hydrodynamiques qui sont très efficaces assurent à l'A.Q.L. une bonne manœuvrabilité. La figure I-36 donne l'allure des courbes de traînée et de poussée en fonction de la vitesse par rapport à l'eau. Par suite de la pression élevée du coussin, la bosse de déjaugeage est très marquée pour la profondeur critique mais beaucoup moins pour la profondeur illimitée.

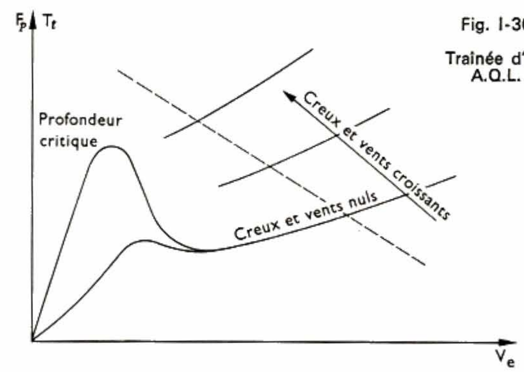


Fig. I-36
Traînée d'un A.Q.L.

CHAPITRE II

LES STRUCTURES ET LES MATÉRIAUX

Bien que la technique des aéroglisseurs ait connu jusqu'à présent ses principaux développements sur mer, la technologie de construction de ces machines a emprunté beaucoup plus à la technique aéronautique qu'à la construction navale.

En effet, l'aéroglisseur, comme l'avion, est une machine volante plus lourde que l'air qui, pour vaincre la pesanteur au prix d'une dépense d'énergie modérée, doit être dotée d'un rendement constructif élevé. Il est évident que ce sont les innovations survenues au cours des dernières décennies dans la conception et la production des cellules d'avion, grâce à l'utilisation de matériaux récemment mis au point par la métallurgie et la chimie notamment, qui ont permis de réaliser, au pied levé, les premiers appareils à coussin d'air par filiation directe à partir des méthodes habituelles de production des avions et bien souvent en utilisant les moyens industriels de la construction aéronautique.

Toutefois, sous l'influence du milieu naturel particulièrement contraignant dans lequel ces machines sont appelées à évoluer, comme sous l'influence des conditions économiques sévères du marché qui leur est dévolu, une technique spécifique de construction de ces machines commence à poindre; elle semble se soucier davantage des qualités marines et des coûts de fabrication du matériel.

En effet, on s'est très vite rendu compte que les aéroglisseurs marins devaient présenter une flottabilité de durée illimitée et une grande stabilité à flot, résister à l'impact des vagues en flottaison comme à l'amérissage, pouvoir accoster un quai ou une autre embarcation. Ils devraient satisfaire tous les critères propres à la navigation en mer qui, comme l'indispensable résistance à la corrosion intense des métaux en atmosphère saline, influent beaucoup sur la conception des structures d'aéroglisseurs tant en ce qui concerne leur architecture que les matériaux

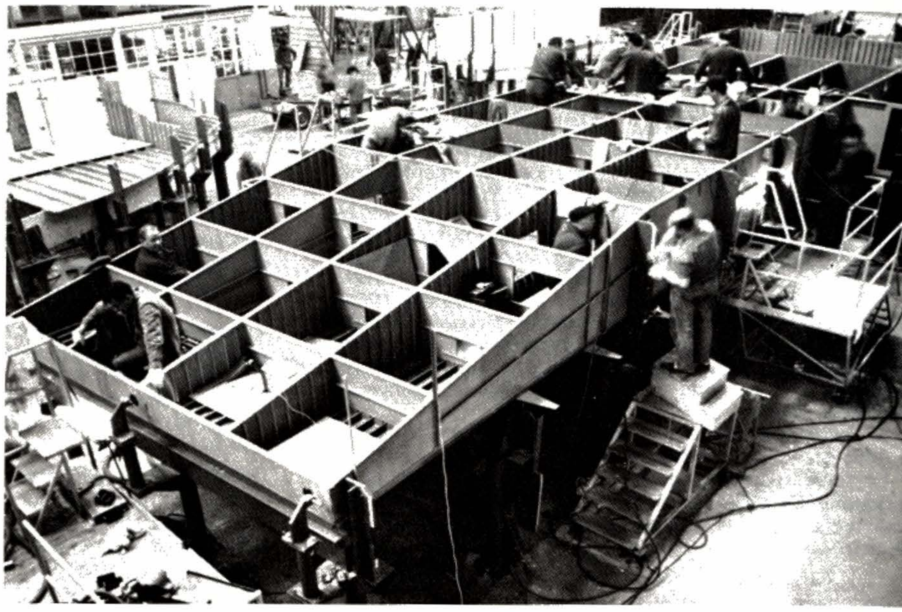


Fig. II-1

Construction du N. 300 (*S.E.D.A.M.*)

employés et leur mode d'assemblage. De plus, pour produire à bas prix ces machines, qui doivent entrer en compétition directe avec des moyens de transport économiques comme les ferry-boats, il fut difficile de continuer à utiliser sans les amender les méthodes de construction des structures d'avion, performantes du point de vue du rendement constructif, mais trop coûteuses.

Ainsi les constructeurs sont passés, timidement puis avec plus d'audace, de l'application de procédés technologiques existants sur des machines d'un genre nouveau, à la recherche de nouveaux concepts technologiques pour parfaire et rentabiliser ces machines, afin de proposer aux armateurs des outils de travail rentables et sûrs.

L'aéroglisseur a commencé par adopter comme principal matériau de construction un alliage à base d'aluminium et cuivre, utilisé en tôles minces (0,6 à 2 mm), le duralumin (AU 4 G). Ce matériau, cher à l'aéronautique, fut choisi (sans enthousiasme d'ailleurs) à cause de ses bonnes qualités de résistance mécanique eu égard à sa densité. Au contraire, sa médiocre résistance à la corrosion marine a nécessité la mise au point de gammes complexes de protection par peinture aussi bien en ce qui concerne la qualité et la multiplicité des produits que les modes d'application. Aussi lui préfère-t-on de plus en plus un alliage d'aluminium soudable, le duralinox (AG 4 MC ou AG 5) bien que les qualités mécaniques de ce dernier soient nettement inférieures (limite élastique 11 à 14 hbar au lieu de 28 pour l'AU 4 G). En revanche, sa tenue en atmosphère marine est apparue très bonne même sans aucune protection de surface. Cet alliage permet également de réaliser des assemblages par soudage qui, vu l'amélioration des techniques de soudage des métaux légers acquise récemment par certains chantiers navals, s'avère beaucoup plus économique que les procédés de rivetage ou de collage habituellement utilisés dans la construction aéronautique. Ainsi les alliages à haute résistance spécifique mis au point par l'aéronautique sont progressivement abandonnés au profit d'alliages moins performants mais permettant d'obtenir des structures qui, bien que moins légères, sont réalisées à moindre coût.

Cependant, les méthodes d'assemblages courantes en aviation ont été largement utilisées dans la construction des machines de conception ancienne (N 300 de la S.E.D.A.M. (fig. II-1) et SRN 4 de B.H.C.), par exemple, pour la fixation, par rivetage ou collage, des raidisseurs des panneaux de tôles ou *âmes* formant les poutres résistantes des caissons de flottabilité. Le collage joue également un rôle important dans la confection des panneaux *sandwichs* en nid d'abeilles ou en mousses plastiques alvéolaires dont l'emploi a été et demeure très répandu, soit pour réaliser de simples planchers ne supportant que les charges locales (technique B.H.C.: SRN 4), soit pour faire participer de surcroît ces planchers à la tenue des efforts généraux de flexion appliqués à l'ensemble de la structure (technique S.E.D.A.M.: N 300).

La technique du soudage utilisé comme moyen d'assemblage préférentiel, de pair avec l'adoption d'un alliage léger inoxydable à faible résistance spécifique, apparaît dans le N 102 C de la S.E.D.A.M. (Conception Grihangne) pour la réalisation d'une structure en treillis destinée à raidir un plancher porteur (V. fig. II-2). Cet appareil apparaît comme un mutant où toutes les tendances nouvelles en matière de structure spécifique d'aéroglisseurs, bien qu'embryonnaires, commencent à émerger. Notons, par exemple, la très grande place cédée à l'emploi des plastiques renforcés de fibre de verre à base desquels sont confectionnés l'ensemble du fuselage (formant étrave, cabine de pilotage, cabine passagers, conduit ventilateur et carénages d'hélices), les pales du ventilateur et des hélices, les sièges, etc., le tout atteignant 40 % de la masse à vide de l'appareil. Notons aussi la place accrue réservée aux structures gonflables qui, ici, constituent la totalité de la réserve de flottabilité de l'appareil.

Les plastiques renforcés, matériau généralement obtenu par moulage au contact de plaques minces composées de tissus de verre imprégnés de résine polyester ou époxyde sont particulièrement bien adaptés à la confection de structures pour aéroglisseurs. Ils s'imposent de plus en plus grâce à leur excellente tenue à la corrosion, à leur résistance spécifique parfois très grande et à leur très bonne résistance aux efforts alternés et aux vibrations. Ils présentent aussi la qualité appréciable de pouvoir épouser, sans façonnage onéreux, des formes complexes et non développables, d'inspiration esthétique propre à la recherche d'optimums du point de vue aérodynamique, et cela pour des coûts de production largement compétitifs dans le domaine des petites séries (qui est celui du marché actuel des aéroglisseurs).

La tendance actuelle la plus répandue chez les grands constructeurs consiste à utiliser principalement ce matériau pour la construction des hélices aériennes, en remplacement de l'alliage léger, dans le but de réduire le niveau de bruit grâce à la possibilité offerte de confectionner sans accroissement de masse des pales larges et de plus grand diamètre tournant à faible vitesse périphérique. Cependant, les machines à quilles latérales (Hovermarine HM 2) comme les machines à jupes souples de très petit tonnage (biplaces, quadriplaces) produites récemment ou en projet (Hoverhawk, Hovercat, Sand Piper, Falcon, NJ-70) emploient ce matériau pour la construction de cellules complètes formant coque, habitacles et conduits de ventilateurs ou de soufflantes.

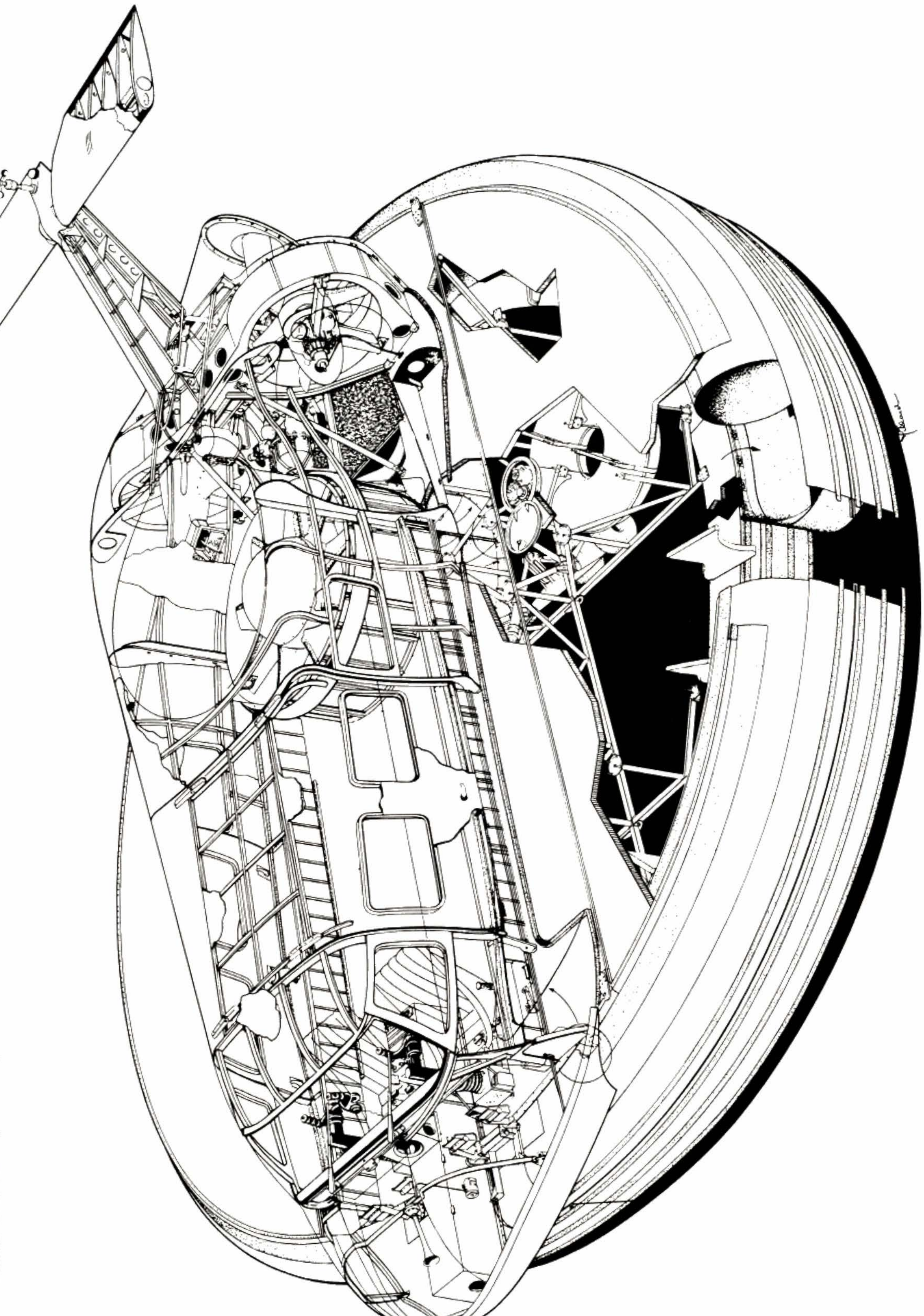
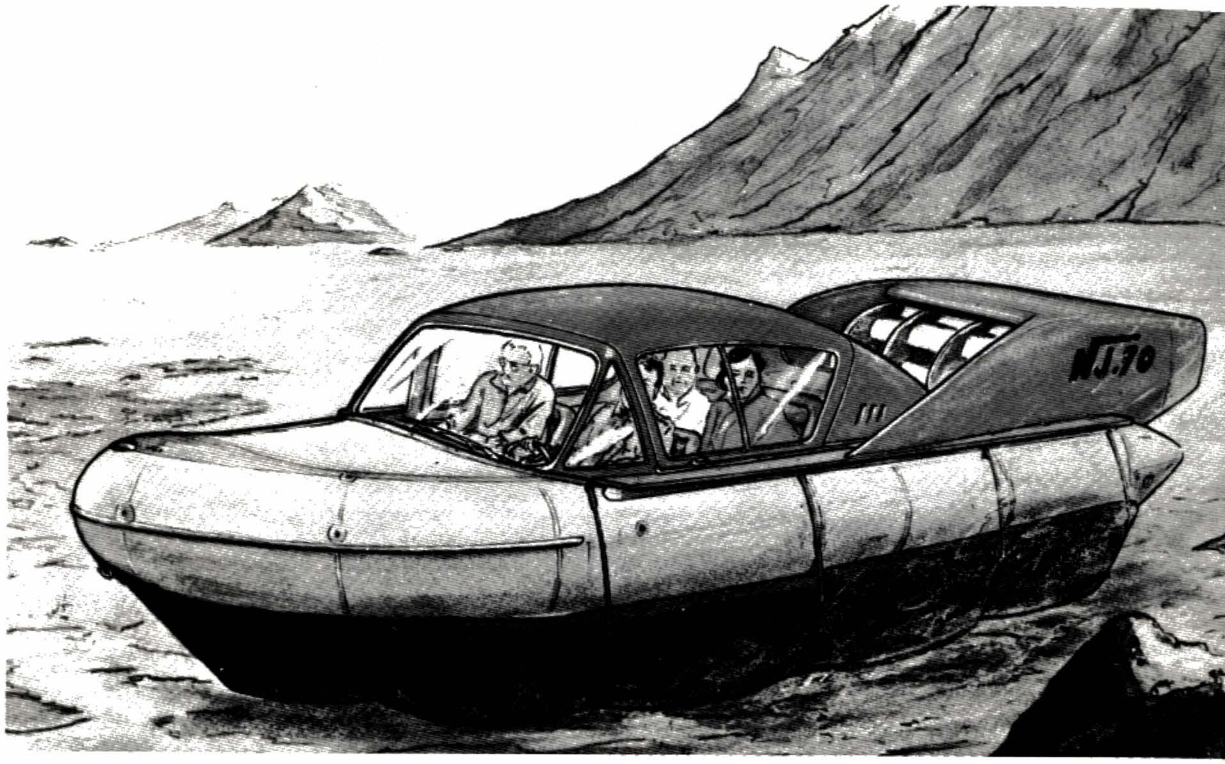
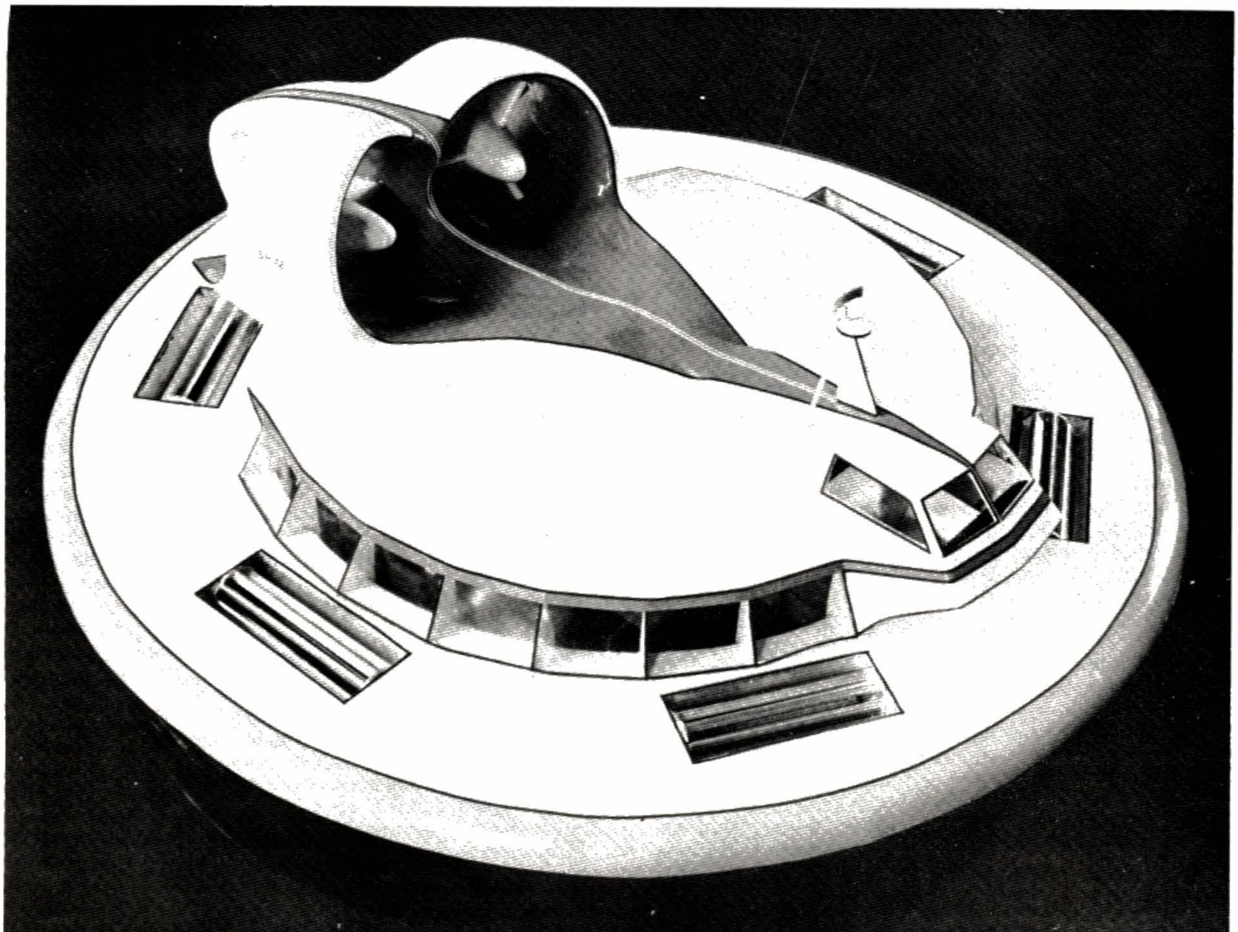


Fig. II-2
Écorché du N 102 C (*S.E.D.A.M.*)



Navijet NJ 70 (*A. Grihangne*)



Navijet SH 72 (*A. Grihangne*)

Quant aux structures gonflables qui sont réalisées comme les jupes souples à base de tissus (polyamides, polyesters, rayonne) enduits de gommes synthétiques (néoprène, hypalon) et assemblées par collage à froid, couture ou vulcanisation, leur emploi, déjà inauguré sur les machines expérimentales (Bertin BC. 8) tend à se généraliser. D'abord limitées au rôle auxiliaire de protection contre l'accostage de structures rigides, légères et fragiles, de conception aéronautique (Bertin BC. 8, S.E.D.A.M. N 300) puis au rôle plus noble d'unique réserve de flottabilité (S.E.D.A.M. N 102 C), elles sont devenues de véritables structures travaillantes notamment sur des machines expérimentales construites entièrement en éléments souples pressurisés. Elles peuvent constituer des structures latérales qui, dégonflées, permettent à la machine de réduire son envergure au gabarit routier (CC 7); sur la machine hybride NJ-70, pour la première fois elles prennent la forme d'un *dinghy* à coque planante en réconciliant l'aéroglisseur à jupes souples avec les formes marines du bateau. Elles présentent le grand avantage de diffuser dans la structure les efforts dus à l'impact des vagues et de limiter la fatigue des éléments rigides.

Ainsi pour comprimer les coûts, pour résoudre les problèmes posés par la navigation sur mer et l'ambiance saline, de nouveaux matériaux et de nouveaux moyens d'assemblage ont commencé à s'imposer concurremment aux matériaux hérités de la construction aéronautique et adoptés d'emblée à l'origine de cette technique. Toutefois, pour combler le handicap dû à la plus faible rigidité de ces nouveaux produits comme pour utiliser au mieux leurs qualités propres, il a fallu adapter à leur intention l'architecture des machines afin d'obtenir un rendement constructif élevé moins par la résistance propre des matériaux utilisés que par l'arrangement général des structures. Les machines les plus anciennes de conception se sont inspirées assez fortement de l'architecture de l'aéronef moderne courant. Dans le SRN 5 (BHC) par exemple, l'ossature travaillante est constituée par un fuselage coque, alors que les parties latérales, d'ailleurs démontables, sont rapportées sur les flancs de celui-ci pour élargir la surface portante à l'instar des ailes de l'avion. Dans un but de simplification, sur les plus grosses machines (SRN 4, N 300, Voyageur) on a réalisé des caissons structuraux parallélépipédiques qui assurent, outre la flottabilité, l'essentiel de la reprise des efforts généraux alors que les superstructures ou roofs participent assez peu à la résistance de l'ensemble et peuvent de la sorte être supprimés ou traités plus économiquement. Toutefois, bien que s'écartant quelque peu du schéma architectural de l'avion et abandonnant le *fuselage coque*, ces structures utilisent à loisir la technique de la *poutre à âme mince* qui est à la base de la construction des cellules d'avion, singulièrement en ce qui concerne les longerons de voilures. En effet, ces caissons sont constitués par une série de poutres croisées longitudinales et transversales, composées de panneaux de tôles minces ou âmes rigidifiées par des raidisseurs verticaux collés ou rivés, et bordés à leurs lisières inférieures et supérieures par des profilés massifs ou *semelles*. Ces poutres sont conçues ainsi pour assurer un travail optimal en flexion au moindre poids. Elles sont complétées, pour réaliser un *caisson de torsion*, par un fond et un plancher se présentant généralement sous forme des panneaux sandwichs boulonnés sur les semelles; ils reçoivent d'un côté la poussée du coussin d'air et de l'autre les charges transportées.

L'expérience a montré que cette architecture, géométriquement simple, était pourtant délicate et coûteuse de réalisation, dans la mesure où il était nécessaire d'imposer une étanchéité parfaite et une protection efficace contre la corrosion marine à ces assemblages orthogonaux rivés. Celle-ci trouve un terrain de prédilection dans ces espaces confinés, difficilement visitables et fertiles en interstices entre tôles mal jointes. En effet il ne faut pas oublier que la réalisation de réservoirs structuraux pour carburant sur avion est encore aujourd'hui considéré comme une technique fort délicate et onéreuse.

C'est pourquoi la tendance nouvelle consiste, soit à dissocier les organes résistants des organes de flottabilité (N 102 C), soit à utiliser comme éléments résistants des corps creux cylindriques ou toriques facilement réalisables par soudage avec une technique inspirée des réservoirs industriels (SH-72; procédés Grihangne). Dans les deux cas, les poutres structurales supportant les planchers ne jouent plus aucun rôle de cloison étanche: elles peuvent être réalisées en treillis soudés. Les fonds, donc les espaces confinés, sont supprimés, ce qui facilite la ventilation des structures, leur visite et, éventuellement, leur rinçage périodique à l'eau douce.

Ainsi la structure d'aéroglisseur sorti du même nid que la cellule d'avion, se transforme dans le temps d'un projet à l'autre, au cours de ses affrontements impitoyables avec le milieu marin et le marché économique. Contraint de remodeler ses formes et l'agencement de ses organes, celui-ci donne et donnera naissance à des architectures nouvelles et à des techniques de fabrication spécifiques. Au fur et à mesure du développement de la production de ces machines dans le monde, il se créera une industrie nouvelle, importante, dont les procédés et les concepts de construction viendront s'insérer tout naturellement dans le no man's land technique qui existe aujourd'hui entre le chantier naval et l'usine de construction aéronautique.

CHAPITRE III

LES MATÉRIELS EN SERVICE OU EN PROJET

Après avoir vu dans les chapitres précédents sur quels principes était fondé le fonctionnement des aéroglisseurs à coussin d'air et comment la structure de ces appareils pouvait être conçue et réalisée, nous allons maintenant examiner à travers des exemples concrets les solutions d'ensemble qui ont été apportées aux problèmes rencontrés. La comparaison des appareils en service ou en projet en ce qui concerne l'architecture, l'agencement général, les organes principaux, les caractéristiques et les performances donne des résultats intéressants et permet de déduire quelques principes généraux pouvant être appliqués par la suite dans la conception de nouveaux appareils.

1. L'ORGANISATION DES SYSTÈMES DE PROPULSION ET DE SUSTENTATION

Les aéroglisseurs A.S.A.S. se distinguent de tous les autres types de véhicules existants par la nécessité d'une motorisation de la sustentation.

L'installation motrice se voit donc attribuer un double rôle qui doit être assumé de la manière la plus simple et la plus efficace possible. Ce problème se pose à l'origine de la conception d'une nouvelle machine. Les fonctions de propulsion et de sustentation peuvent être, soit intégrées, soit entièrement séparées, soit comporter des couplages plus ou moins serrés.

D'un côté la séparation complète des deux fonctions qui implique l'installation d'au moins deux unités motrices, apporte une certaine sécurité et une grande souplesse de fonctionnement. Les ventilateurs sont entraînés par un ou plusieurs moteurs de sustentation, les propulseurs par un ou plusieurs moteurs de propulsion qui n'ont rien de

---

Remarque : Dans ce chapitre, les puissances des turbines sont exprimées en chevaux vapeur (symbole: ch) car l'utilisation de cette unité est encore très fréquente dans le domaine considéré. Rappelons cependant que l'unité de puissance du système international est le watt:

1 ch = 736 W = 0,736 kW

commun sauf quelques éléments de circuits dont la fiabilité est très grande. L'aéroglisseur peut en général continuer son voyage à vitesse très réduite avec la propulsion ou la sustentation en panne. Il suffit pour cela de prévoir des dispositifs auxiliaires permettant d'utiliser la réaction du jet d'air de sustentation en cas de panne de propulsion, et la navigation sur carène ou le roulage au sol, presque toujours possibles, en cas de panne de sustentation. Le système est simple, permet d'adapter la puissance distribuée aux propulseurs et aux ventilateurs en fonction des conditions extérieures, mais nécessite théoriquement une puissance installée plus grande et un plus grand nombre de moteurs que le système intégré, dans lequel un même moteur entraîne à la fois des ventilateurs et des propulseurs. Le système séparé est utilisé sur le Hovermarine HM 2, le Terraplane BC 7 et sur bon nombre de petites machines. En revanche, le système mécaniquement intégré fait appel à des transmissions longues et coûteuses. La puissance doit être portée et distribuée à des organes éloignés les uns des autres. Sa répartition entre les différents organes est délicate. Elle exige l'adoption de dispositifs de variation de pas, de convertisseurs de couple, une régulation soignée et parfois, lorsque les moteurs sont des turbines à gaz liées, la présence d'un embrayage sur la chaîne de sustentation. Le système mécaniquement intégré est utilisé sur les BHC, SRN 6, SRN 4, BH 7, le cushioncraft CC 7, le Vosper VT 1, le Bell aerospace Canada « Voyageur », les « Naviplane » N 300 et N 102.

En particulier le Naviplane N 300 comporte des liaisons mécaniques telles que, en cas de panne d'une unité motrice, l'unité motrice restant en service entraîne l'ensemble des hélices et des ventilateurs.

Nous voyons donc qu'il existe des aéroglisseurs utilisant l'un et l'autre système. La possibilité d'ajuster la puissance disponible aux propulseurs et aux ventilateurs en fonction des conditions extérieures rencontrées (nature du sol, conditions marines et atmosphériques) est un avantage considérable sur les plans des performances et du confort du véhicule, qui est presque toujours recherché. Elle ne peut se faire dans le système séparé qu'au prix d'une réserve de puissance importante sur chacune des deux fonctions et dans le système mécaniquement intégré qu'au prix d'une grande complexité mécanique. La consommation de combustible du système séparé est par conséquent, en principe, plus grande et l'autonomie plus faible que dans le système mécaniquement intégré. En revanche, ce dernier présente en général un coût de maintenance horaire plus important.

En définitive, le choix entre les deux systèmes dépend beaucoup du programme et des unités motrices envisagées. Signalons que le système intégré est le plus utilisé sur les aéroglisseurs à coussin d'air de taille intermédiaire.

Outre la nature du système envisagé, l'organisation des systèmes de propulsion et de sustentation doit aussi tenir compte de considérations de stabilité et plus particulièrement de stabilité en lacet du véhicule. Elle met en jeu des forces dont les moments par rapport au centre de gravité, et leurs variations, doivent faire l'objet d'estimations au départ, et de calculs plus poussés par la suite, pour vérifier que dans tout le domaine de vol aucune instabilité statique ou dynamique, désagréable voire dangereuse, n'apparaît. S'il n'en était pas ainsi, compte tenu des forces et moments des forces extérieurs agissant sur le véhicule, cette organisation devrait être reconsidérée.

Il s'ensuit, par exemple, que pour obtenir un appareil amphibie indifférent ou très légèrement divergent en lacet comme on le souhaite généralement, les ventilateurs et les hélices aériennes doivent être installés légèrement vers l'arrière de la plate-forme. Les contraintes d'équilibrage à toutes les vitesses et dans tous les cas de chargement achèvent le plus souvent de définir l'avant-projet de l'appareil. Il importe alors d'en assurer le contrôle et la manœuvrabilité aussi bien en approche à basse vitesse qu'au régime de croisière.

Pour un aéroglisseur terrestre et pour un aéroglisseur marin non amphibie il est logique et normal de prendre appui sur terre ou sur l'eau. La plupart des aéroglisseurs terrestres non guidés ont des roues motrices et une direction orientant les roues avant comme les véhicules routiers courants, tandis que les aéroglisseurs marins non amphibies font appel à des hélices marines à pas variable réversible ou à des pompes-hélices expulsant des jets d'eau à grande vitesse avec dispositif de déviation du jet. Le contrôle latéral et le contrôle en tangage ne sont pas indispensables. Une inclinaison en roulis est parfois recherchée en virage sur les aéroglisseurs marins. Elle est obtenue facilement et automatiquement par des ailerons fixes judicieusement placés.

Au contraire, pour son pilotage et son contrôle, un aéroglisseur parfaitement amphibie ne peut utiliser que l'appui sur l'air ambiant ou des forces de réaction de jet d'air. Le système devant être efficace à toutes les vitesses par rapport à l'air jusque et y compris aux vitesses négatives, il ne saurait être question d'utiliser des gouvernes non soufflées comme sur les avions. Les différents modèles d'aéroglisseurs amphibies sont donc équipés pour le contrôle en lacet :

— d'un couple d'hélices aériennes à pas variable réversible tournant à régime constant avec pilotage par variation de pas, comme sur le Naviplane N 300 ;

— de gouvernes soufflées et d'évents de contrôle latéral et de contrôle en lacet à basse vitesse, comme sur le Hovercraft SRN 6 ;

— de système de rotation des hélices autour d'un axe vertical, comme sur le Hovercraft SRN 4 ;

— ou de dispositifs variés de déviation de jet d'air de propulsion, comme sur le cushioncraft CC 7.

Le contrôle latéral et le contrôle en tangage sont vivement recommandés, bien que n'étant pas prévus sur toutes les machines. Le contrôle latéral est obtenu par prélèvement d'air sur le circuit de sustentation (évents), ou bien il est une conséquence d'une inclinaison de la plate-forme résultant d'une modification de la géométrie de ce circuit (déplacement du centre de poussée) qui crée une force transversale par réaction de jet.

Le même déplacement du centre de poussée dans le sens longitudinal, accompagné ou non d'un ballastage liquide, peut être utilisé pour régler l'assiette en tangage en fonction du chargement, la variation de cette assiette avec la vitesse pouvant être compensée en partie par une gouverne horizontale.

En conclusion, la manœuvrabilité des aéroglisseurs à coussin d'air est généralement bonne. Le pilote dispose d'organes de commande et de moyens de contrôle rapides et efficaces qui mettent en jeu des forces de l'ordre de 1 % du poids de l'appareil dans le sens transversal, et de 10 % dans le sens longitudinal. La conduite des aéroglisseurs terrestres non guidés et des aéroglisseurs marins non amphibies est simple. En revanche, celle des aéroglisseurs amphibies nécessite du personnel qualifié et expérimenté. L'organisation des systèmes de propulsion et de sustentation est le problème de base le plus compliqué qui se pose sur les aéroglisseurs. Il a été résolu des diverses manières indiquées ci-dessus, chacune d'elles ayant ses avantages et ses inconvénients ; nous les reverrons plus en détail à propos des appareils eux-mêmes.

2. LES AÉROGLISSEURS MARINS

En se limitant toujours aux aéroglisseurs à coussins d'air ou A.S.A.S. il est possible de classer les aéroglisseurs marins existants ou en projet en trois catégories suivant la nature des contacts du véhicule avec l'élément liquide :

— L'absence de contact en croisière sur eau calme définit les appareils parfaitement amphibies à jupes souples et propulsion aérienne qui sont la majorité des appareils réalisés à ce jour (A.J.S.).

Une variante plus « marine », de structure principale également souple, et admettant des contacts épisodiques avec l'eau, est en cours de développement (projet Navijet NJ 70).

— Les appareils à jupes souples et propulsion marine, comme le Vosper VT 1, peuvent s'échouer sur une aire convenablement aménagée et procéder ainsi commodément au chargement et au déchargement de leur cargaison. Ils sont moins sensibles au vent que les A.J.S.

— Les appareils à quilles latérales flanqués de parois rigides qui pénètrent dans l'eau, ont un coussin d'air plus étanche et fonctionnent avec des pressions de coussin plus



Fig. III-1 a

Aéroglisseur SRN 5 (*British Hovercraft Corporation*)

grandes que les autres A.S.A.S. Ils sont donc plus compacts et plus marins bien que leur structure soit plus exposée, mais ils perdent l'avantage du caractère amphibie et sont tributaires des infrastructures portuaires (A.Q.L.).

2.1. Les aéroglisseurs marins à jupes souples (amphibies). — Les A.J.S. les plus connus ou les plus répandus dans le monde sont seuls décrits ci-après. (Pour une information plus complète le lecteur peut se rapporter à l'ouvrage « *Jane's surface skimmer — Hovercrafts and Hydrofoils* » qui paraît tous les ans, édité par *Sampson Low, Marston and Co Ltd*, Londres).

— Les appareils SRN 5 et SRN 6 (fig. III-1 a et b) de la British Hovercraft Corporation (BHC) ont été construits à près de soixante exemplaires depuis 1964. Ils sont du type à jet périphérique comme tous les aéroglisseurs développés jusqu'à présent par la BHC. Ce sont des modèles intégrés de conception très voisine.

● Une turbine à gaz de 900 ch disposée sur le toit de la cabine passagers, face à l'arrière du véhicule, entraîne mécaniquement à travers un réducteur, d'une part, directement dans l'axe une hélice aérienne quadripale à pas variable réversible, d'autre part, par l'intermédiaire d'un renvoi d'angle, un ventilateur centrifuge de sustentation.

● Le ventilateur prélève l'air au-dessus du véhicule pour le distribuer horizontalement dans une chambre de faible hauteur s'étendant sur toute la surface en plan de l'appareil et alimentant le coussin par la périphérie. Les jupes sont en tissus de nylon enduit de néoprène. Elles forment un ensemble en deux parties :

a) le sac (ou *bag*) en forme de boudin souple ceinturant la plate-forme qui recueille l'air en provenance de la chambre ;

b) les doigts (ou *fingers*), éléments juxtaposés amovibles reliés au sac qui distribuent l'air suivant un angle déterminé avec la verticale et assurent l'étanchéité du coussin en suivant le contour de la houle.

Les mouvements verticaux de l'ensemble correspondent à une suspension et contrôlent le débit d'air. Il s'ensuit une limitation des variations de pression du coussin et des accélérations verticales de la plate-forme. La stabilité d'assiette est obtenue par un compartimentage longitudinal et transversal du coussin d'air. Le contrôle en direction et en tangage est obtenu à l'aide d'un double empennage vertical et horizontal placé dans le souffle de l'hélice. En outre, des évents, situés sur les côtés à l'avant et à l'arrière, permettent de prélever de l'air dans la chambre d'alimen-



Fig. III-1 b

Aéroglisseur SRN 6 (*British Hovercraft Corporation*)



Fig. III-2

Aéroglisseur MK 3 dérivé du véhicule civil SRN 6 (*British Hovercraft Corporation*)

tation du coussin pour l'éjecter horizontalement et obtenir ainsi un contrôle additionnel à basse vitesse.

Le SRN 6 (38 passagers) est plus grand et moins rapide que le SRN 5 (18 passagers).

— Le Bell SK 5 est une version modifiée du SRN 5 qui a été utilisée par l'armée américaine au Viet-Nam. Le turbomoteur britannique de 900 ch est remplacé par un turbomoteur américain de 1 150 ch. La porte avant est élargie pour permettre l'embarquement d'une jeep de taille standard. Un armement conventionnel fait de cette machine un véhicule d'assaut performant. Les véhicules militaires MK 3 et MK 4 sont dérivés du SRN 6 (fig. III-2).

— L'Hovercraft SRN 4 de la BHC est le plus gros aéroglisseur existant en service. Le premier exemplaire a été mis en exploitation commerciale sur la Manche en août 1969. Début 1972, cinq appareils étaient sortis des usines de Cowes pour être affectés à des transports de passagers et voitures sur les lignes Douvres-Boulogne et Ramsgate-Calais (fig. III-3). Cette machine amphibie de 170 t est une extrapolation des SRN 5 et SRN 6 en ce qui concerne le coussin d'air et les jupes. Le principe de la propulsion-sustentation intégrée est conservé avec hélices aériennes à pas variable réversible et ventilateurs centrifuges. L'alimentation en air du coussin se fait de la même manière par une chambre mince de faible hauteur s'étendant sur toute la surface en plan de l'appareil. Les jupes sont en similitude de celles du SRN 6. Mais à la différence de ses prédécesseurs, le SRN 4 comporte quatre installations mécaniques indépendantes entraînées par turbines à gaz de puissance moyenne (au total 4 × 3 400 ch). La panne d'une quelconque de ces installations n'empêche pas la poursuite du voyage.

Les hélices sont fixées au sommet de mâts porte-hélices capables de tourner autour d'axes verticaux pour orienter la poussée de chaque propulseur et obtenir ainsi un très bon contrôle à toutes les vitesses et une force latérale importante. Elles sont à pas variable pour permettre une répartition de la puissance entre sustentation et propulsion. Tous ces moyens de contrôle comportent une régulation et une coordination électroniques. Deux dérives aériennes prolongées par des volets peuvent également concourir au pilotage en lacet. La stabilité d'assiette est donnée comme pour les SRN 5 et SRN 6 par un compartimentage longitudinal et transversal du coussin d'air.

Le SRN 4 emporte 254 passagers et 30 voitures.

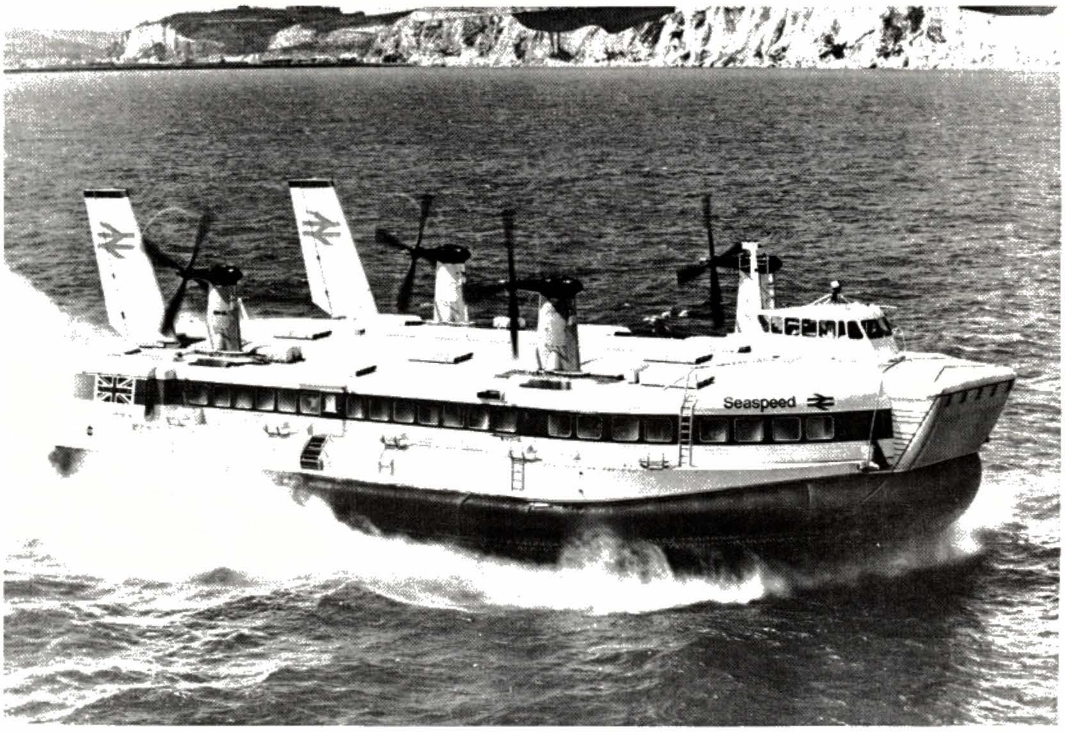


Fig. III-3

Aéroglisseur SRN 4, utilisé sur la traversée de la Manche (*British Hovercraft Corporation*)

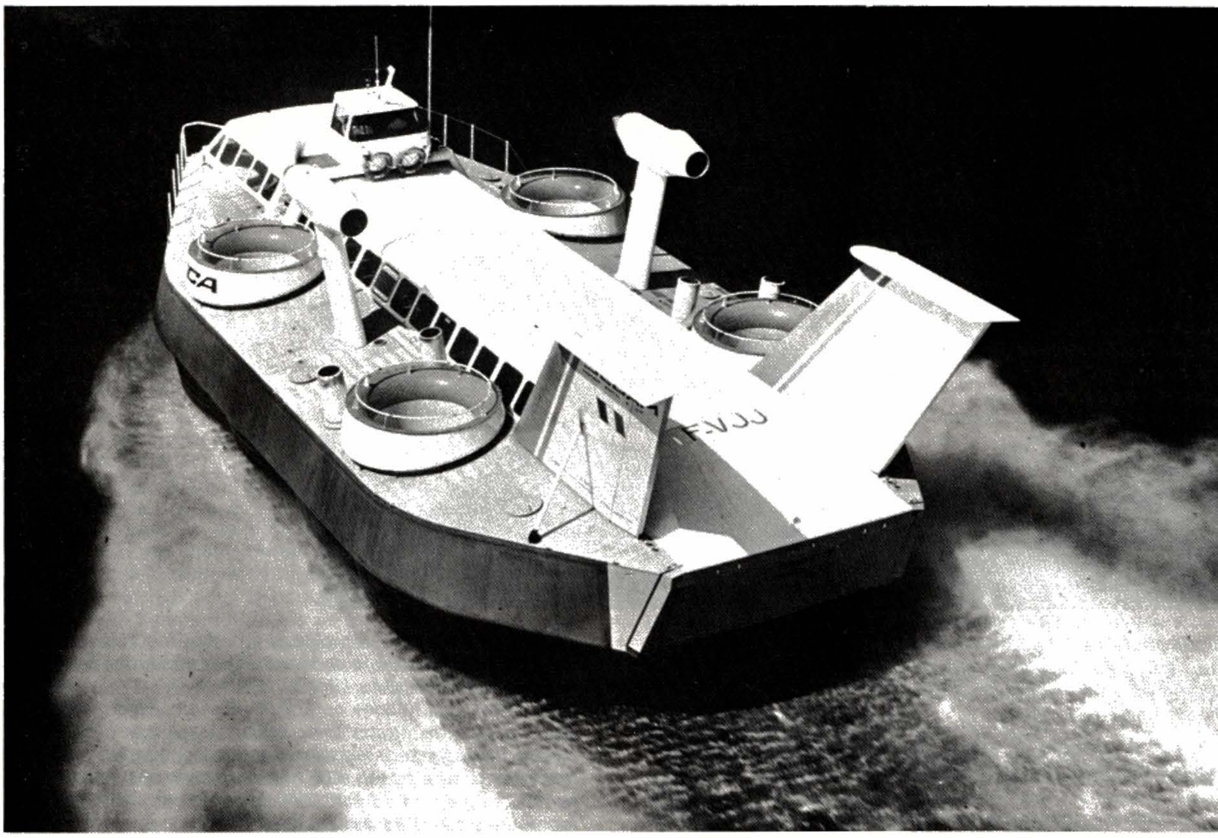


Fig. III-4 a — Naviplane N 300, version adaptée au transport de passagers (*S.E.D.A.M.*)

— Le Naviplane N 300 de la S.E.D.A.M. est sorti en 1967 (fig. III-4 a et b). Deux appareils expérimentaux de ce type ont été réalisés et mis en service commercial expérimental saisonnier sur la Côte d'Azur (depuis 1969) et dans l'estuaire de la Gironde (depuis l'été 1970).

Le coussin d'air à jupes souples est conforme au schéma multijupe avec jupe périphérique (V. chap. 1) qui n'est autre qu'un perfectionnement de la chambre *en cloche.* Huit jupes tronconiques droites en matériau souple sont disposées sous la structure rigide du véhicule constitué de trois caissons longitudinaux juxtaposés. Elles sont entourées d'une jupe périphérique sensiblement de la même hauteur qui délimite le coussin d'air.

L'air de sustentation est forcé par quatre ventilateurs axiaux, à la fois dans les deux jupes internes situées immédiatement en dessous du ventilateur et directement dans la jupe périphérique. Le fonctionnement de ce système est sûr et concilie les impératifs contradictoires de stabilité de la plate-forme et de rendement de la sustentation.

La motorisation du N 300 comme celle des appareils de la BHC intègre les fonctions de propulsion et de sustentation : deux turbomoteurs de 1 250 ch, situés dans les caissons latéraux, entraînent mécaniquement par des arbres souples, chacun deux ventilateurs et une hélice aérienne à pas variable réversible situés d'un même côté du véhicule. Les ensembles bâbord et tribord sont reliés de façon que la panne d'une unité motrice n'empêche pas l'unité motrice restant en fonctionnement d'entraîner l'ensemble des hélices et des ventilateurs. Le N 300 peut ainsi continuer à naviguer à hauteur de vol et à vitesse réduite avec un moteur en panne.

Fig. III-4 b

Intérieur de la cabine du naviplane N 300 (*P. Bertrand S.E.D.A.M.*)





Fig. III-5

Aéroglisseur N 102 C
(*S.E.D.A.M.*)

Le contrôle en lacet du véhicule est obtenu :

— à basse vitesse et en vol stationnaire par variation différentielle du pas des hélices,

— en vol de croisière en actionnant de préférence des volets qui prolongent deux dérives aériennes placées à l'arrière de l'appareil dans le souffle des hélices.

Les ensembles mécaniques tournent à régime constant. La commande générale du pas des hélices a donc pour effet de faire varier la puissance prise par la propulsion sans transfert possible sur la sustentation.

Le N 300 emporte quatre-vingt-dix passagers ou quatre voitures et trente-neuf passagers.

— Le Naviplane N 102 de la S.E.D.A.M. fait suite au N 300 dans les réalisations de cette société. Les deux prototypes ont fait leurs premiers vols en été 1969, équipés d'un système de jupes répondant au même schéma multijupes que celui du N 300. Un deuxième programme prototype N 102 C, lancé en octobre 1969, a reçu un système de jupes issu d'un nouveau schéma : labyrinthe cloisonné de forme en plan circulaire. Suivant ce dernier schéma (V. chap. 1), deux jupes tronconiques droites concentriques forment deux compartiments principaux alimentés par un seul ventilateur soufflant dans le compartiment central. Le compartiment périphérique reçoit de l'air par un passage calibré à la partie supérieure de la jupe interne et par l'intervalle séparant le bas de cette jupe du sol.

Ce compartiment périphérique est subdivisé en six chambres par des jupes cloisons. Chacune des chambres ainsi créées exerce, par son indépendance relative à l'égard des autres chambres, des forces de rappel qui stabilisent la plate-forme à la manière des jupes internes du N 300.

Le N 102 C est motorisé par un turbomoteur de 600 ch installé à l'arrière du véhicule. Il entraîne à la fois le ventilateur axial à pas variable et deux hélices aériennes carénées à pas variable réversible (fig. III-5).

Le choix des hélices carénées provient de la volonté du constructeur de limiter l'encombrement de la cabine pour rendre l'aéroglisseur plus facilement transportable en trois tronçons. Par rapport aux hélices libres ces hélices présentent en outre l'avantage d'être plus silencieuses et moins dangereuses pour les personnes à l'extérieur de l'appareil. De plus leur poussée spécifique est plus grande à la vitesse de déjaugeage. En contrepartie, les performances en vitesse et freinage sont moins bonnes. Comme sur le N 300 le pilotage en direction du N 102 C se fait par variation différentielle du pas des hélices. Les ensembles mécaniques tournent à régime constant. Les commandes de pas agissent ainsi directement sur la puissance prélevée par l'utilisateur : par mer agitée le pilote augmente le pas du ventilateur et diminue le pas des hélices, par mer calme il réalise l'opération inverse.

Le N 102 C transporte quatorze personnes.

— L'aéroglisseur CC 7 de *Cushioncraft*, filiale de *Britten-Norman*, est une machine intéressante parce qu'elle comporte un certain nombre d'originalités. Le premier prototype a été lancé en 1968 (fig. III-6).

Le coussin d'air est toujours basé sur le principe du jet périphérique mais avec des jupes différentes de celles des appareils BHC. La forme des éléments juxtaposés change. Leur liaison avec la partie supérieure et leur alimentation ne sont pas réalisées de la même manière. Le système de jupes du CC 7 correspond à une licence de Hovercraft Development Limited.

Les parties latérales de la structure sont formées d'éléments souples gonflables qui peuvent être dégonflés pour

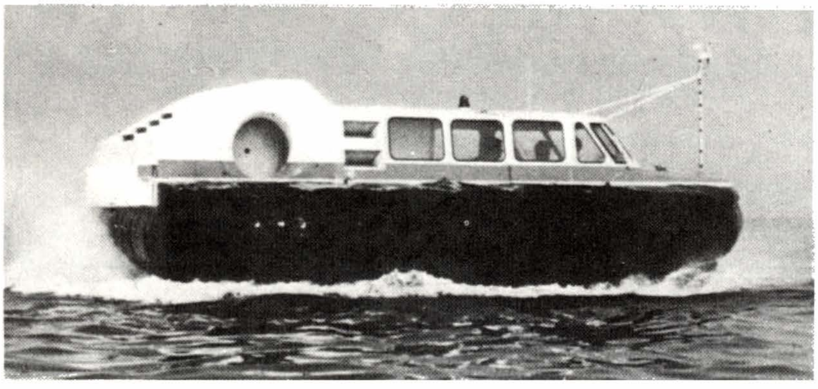


Fig. III-6

Aéroglisseur CC 7
(*Cushioncraft*)

réduire la longueur du véhicule pendant son transport sans que des démontages soient nécessaires.

La motorisation est assurée par une turbine à gaz de 390 ch qui entraîne, à travers un réducteur et un renvoi d'angle, deux ventilateurs centrifuges à axe horizontal disposés de part et d'autre de l'axe longitudinal à l'arrière du véhicule. Chaque ventilateur alimente à la fois la sustentation et la propulsion. Une partie du débit est distribuée aux jupes tandis que la plus grande partie sert à pousser l'appareil par réaction de jet en passant par des aubages déflecteurs ou d'inversion de poussée.

Le CC 7 est ainsi conçu pour être particulièrement silencieux, commode et maniable au détriment du rendement énergétique et des performances. Il emporte dix personnes.

— Le Navijet NJ 70 marque une transition avec les aéroglisseurs non amphibies. Il s'agit d'un projet d'appareil de petite taille qui vise à tirer le meilleur parti d'une structure souple réalisée en grande série pour canot pneumatique. La bonne tenue à la mer de ces canots est connue. Leur coque gonflable réalise en effet les six rôles suivants : élément de flottaison, élément de repos sur sol inégal, coque planante, élément de suspension et d'accommodation aux efforts généraux et locaux, de proue résiliente au choc des vagues et de défense périphérique en cas de collision ou d'accostage brutal.

Le dispositif alvéolaire de confinement et d'alimentation du coussin est fixé sous la coque, vers la périphérie. Il se replie lorsque l'alimentation en air est interrompue, ce qui permet, à tout moment, la transformation de l'aéroglisseur léger, limité à des plans d'eau calme, en bateau à coque planante dont les possibilités opérationnelles sont supérieures par mer agitée.

Le NJ 70 est équipé d'un ventilateur tangentiel à axe horizontal orienté transversalement qui, comme sur le CC 7, alimente à la fois la sustentation et la propulsion. Un déflecteur permet de choisir la part du débit d'air destiné à l'une ou à l'autre fonction. De même, des volets sont disposés sur la tuyère d'éjection rectangulaire pour le contrôle en lacet.

Le Navijet NJ 70 emporte quatre personnes dans de bonnes conditions de sécurité par mauvaise mer et est, en outre, particulièrement silencieux.

2.2. Les aéroglisseurs marins à jupes souples (semi-amphibies). — Cette catégorie d'appareils est représentée aujourd'hui par le Vosper Thornycraft VT 1 sorti fin 1969. Plusieurs exemplaires ont été construits depuis cette date et deux d'entre eux sont prévus pour assurer la desserte Copenhague-Malmö entre le Danemark et la Suède. Le VT 1 présente la particularité d'associer coussin d'air à jupes souples et propulsion marine.

Il peut venir s'échouer au rivage, la proue au sec, à la manière de certains bâtiments de débarquement militaires, pour charger et décharger ses passagers et voitures.

Il est équipé de deux turbines à gaz de 2 000 ch disposées, comme sur le N 300, en abord et au milieu de l'appareil. Chaque turbine entraîne deux paires de ventilateurs centrifuges et, par l'intermédiaire d'un renvoi en V, une hélice marine à pas variable réversible placée derrière un appendice marin destiné à servir à la fois de quille et de patin d'échouage.

Le contrôle directionnel est obtenu normalement en croisière par deux gouvernails situés derrière les hélices ; mais des virages plus serrés peuvent être exécutés en utilisant, en plus, le pas variable qui doit de toute façon être employé à bonne vitesse.

Le VT 1 vise à combiner la faible résistance à l'avancement des A.J.S. et la forte poussée spécifique, indépendante du vent, de la propulsion marine pour réaliser une vitesse soutenue par mer agitée. Cette solution implique en revanche des installations terminales spéciales, moins commodes que celles des aéroglisseurs totalement amphibies.

Le VT 1 emporte deux cent soixante-dix passagers ou cent quarante-six passagers et dix voitures.

2.3. Les aéroglisseurs marins à quilles latérales. — Cette catégorie d'A.S.A.S. est développée parallèlement aux États-Unis d'Amérique et en Grande-Bretagne depuis 1960.

Les États-Unis d'Amérique ont d'abord mis sur pied un programme de recherches en juillet 1961, puis la Marine américaine a construit et lancé un engin expérimental de 8 t, le *Captured Air Bubble* XR 1, en mai 1963.

La Grande-Bretagne a construit quatre appareils de 28 t « *Denny D* 2 » entre 1962 et 1963 et les a exploités commercialement. De nouveaux programmes ont suivi qui ont conduit début 1972, en Grande-Bretagne, au véhicule *Hovermarine* HM 2, et aux États-Unis d'Amérique aux véhicules expérimentaux *Surface Effect Ship* 100 A de *Aerojet general corporation* et 100 B de *Bell Aerospace Div. of Textron*.

— Le Hovermarine HM 2 est sorti en 1968 ; il est utilisé en exploitation commerciale, notamment sur la côte sud de Grande-Bretagne (fig. III-7). À la différence des autres catégories d'aéroglisseurs, le coussin d'air à quilles latérales s'accommode de moteurs Diesel rapides, du moins pour les faibles tonnages. Cette solution a été retenue sur le HM 2 où la sustentation est assurée par un moteur de 165 ch



Fig. III-7

Aéroglisseur
Hovermarine HM 2
(*Southern Photographic Studios*)

entraînant cinq ventilateurs centrifuges dont deux paires situées à l'avant (entraînement par courroies crantées) et un situé à l'arrière (transmission hydrostatique).

La propulsion est entièrement séparée et assurée par deux moteurs de 280 ch entraînant chacun une hélice marine subcavitante.

Deux gouvernails à axe incliné sur la verticale donnent à la fois le contrôle en lacet et une inclinaison favorable du véhicule vers l'intérieur du virage.

La stabilité d'assiette provient de la flottabilité des quilles qui, en vol de croisière, n'est pas inférieure à 10 % de la portance totale.

Le HM 2 emporte soixante passagers.

— Les appareils SES 100 A de *Aerojet* et 100 B de *Bell Aerospace* étaient les plus gros A.Q.L. fabriqués dans le monde en 1972. Ce sont des machines exclusivement expérimentales représentant dans l'esprit de l'« U.S. Navy » une étape vers un futur aéroglisseur lourd océanique. Des solutions techniques différentes ont été adoptées sur ces deux machines à des fins de comparaisons respectives. C'est ainsi que le SES 100 A est mû par quatre turbomoteurs indépendants entraînant chacun un jet d'eau aérien et un ventilateur, l'un et l'autre à géométrie variable. Le système est intégré. Au contraire le SES 100 B est équipé de six turbomoteurs dont trois de puissance moyenne pour la propulsion et trois de faible puissance pour la sustentation. Les trois premiers entraînent deux hélices supercavitantes et les trois autres huit ventilateurs.

Les dimensions du SES 100 A sont plus grandes que celles du SES 100 B. Les deux appareils sont étudiés pour se déplacer à 80 nœuds par mer calme et vent nul (150 km/h environ).

En conclusion, pour les aéroglisseurs marins, il semble qu'il se dessine actuellement une tendance à limiter, voire à abandonner le caractère amphibie sur les grosses machines pour pouvoir obtenir des avantages de tenue à la mer et de simplicité de la propulsion et aboutir à des réalisations moins onéreuses. De toutes façons, à partir d'un certain tonnage, les problèmes de jupes et l'échouage deviennent très difficiles.

3. LES AÉROGLISSEURS TERRESTRES NON GUIDÉS

La présentation des matériels ne serait pas complète sans une mention des véhicules automoteurs et des plates-formes remorquées terrestres, bien que ce secteur ait rencontré un développement plus lent que le secteur maritime.

Les travaux ont été importants en France avec la gamme des Terraplane de Bertin et Cie et de la S.E.D.A.M. (BC 4, BC 6, BC 7, T 3 S ; fig. III-8).

Au Canada une plate-forme remorquée de 180 t, destinée à la recherche pétrolière, a aussi été réalisée (ACT 100).

— Le Terraplane T 3 S de la S.E.D.A.M. est né en 1971. C'est un véhicule automoteur de 3 t au gabarit routier (2,50 m de largeur), capable de s'insérer dans une circulation normale et de fonctionner sur coussin d'air sur piste. Dans ce deuxième mode de fonctionnement les roues exercent sur le sol un appui variable choisi par le conducteur en fonction de la nature du terrain pour obtenir l'effort de traction maximal. Mais elles participent pour une faible part seulement à la portance de l'appareil, ce qui l'empêche théoriquement de s'embourber sur terrain meuble. Le coussin d'air est du type multijupes avec jupe périphérique qui donne des moments de rappel en roulis relativement grands.

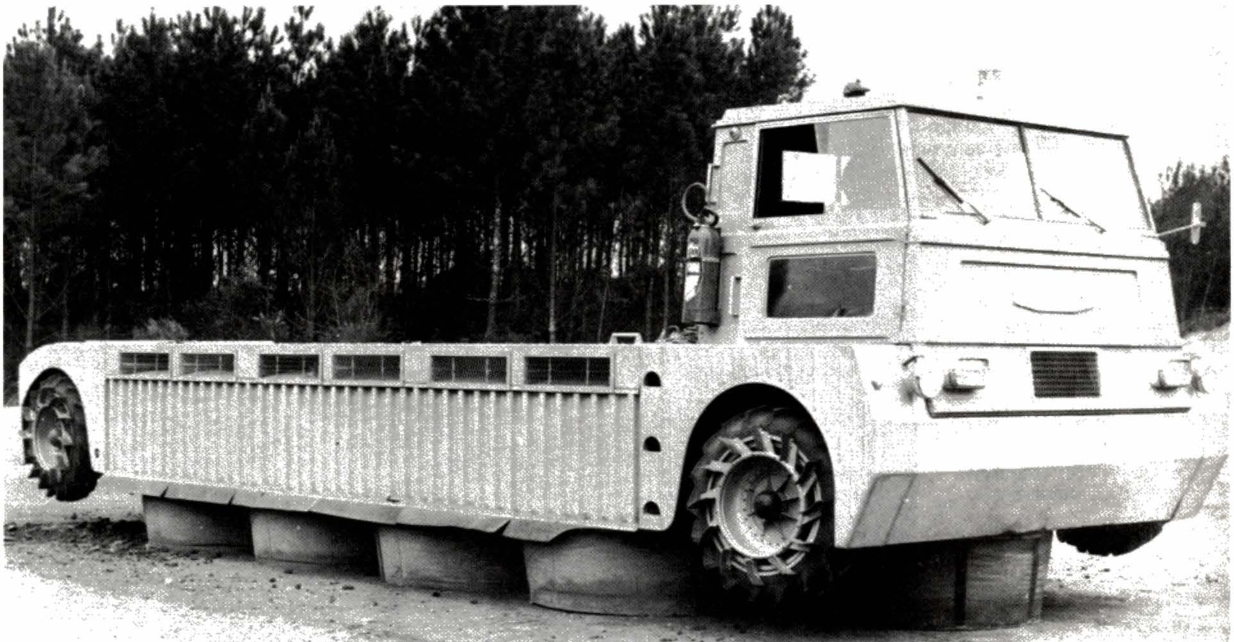
Les fonctions de propulsion et de sustentation sont séparées avec le moteur le plus puissant pour la sustentation (270 ch) ; la propulsion est assurée par un moteur d'automobile de cylindrée moyenne (80 ch). La transmission du mouvement aux roues met en œuvre une pompe hydraulique à débit variable qui entraîne des moteurs situés au droit de chaque roue. Une démultiplication est toutefois nécessaire pour obtenir un couple suffisant à la roue. Dans le fonctionnement sur route, sans le coussin d'air, le T 3 S n'utilise que deux roues motrices.

— La plate-forme remorquée ACT 100 est une plate-forme destinée au transport de derrick ou d'équipements de forage divers à travers des étendues plates sur sol inconsistant. Elle évite le démontage complet d'une installation pour son transport.

Le système de jupes est du type HDL segmenté à jet périphérique alimenté par deux ventilateurs centrifuges à gros débit. La puissance de sustentation est assez importante (1 280 ch) pour permettre le passage d'obstacles divers. Le remorquage est normalement réalisé au moyen d'un tracteur à chenilles. De plus, la plate-forme est conçue pour être opérationnelle dans les conditions climatiques extrêmement rigoureuses de la Sibérie ou du Nord Canada.

D'autres applications terrestres ont encore été développées pour les A.S.A.S. parmi lesquelles l'assistance aux convois routiers exceptionnels dans le transport de charges lourdes pour diminuer la charge à l'essieu. Leur examen détaillé sortirait du cadre de cet ouvrage qui se limite aux seules applications les plus importantes.

Fig. III-8 — Terraplane BC 7 en sustentation, roues relevées (*S.E.D.A.M.*)



CHAPITRE IV

ESSAIS

1. GÉNÉRALITÉS

Depuis la conception d'un aéroglisseur jusqu'à l'achèvement des vols de mise au point du prototype, de nombreux essais jalonnent cette période. À la fin de celle-ci, on possède une liasse de fabrication permettant de construire une série d'aéroglisseurs qui satisfait les spécifications techniques formulées au moment du lancement de l'opération. Les résultats des essais doivent être connus au fur et à mesure des besoins. Il est donc nécessaire de planifier correctement l'utilisation des moyens d'essais existants ainsi que la mise en place des moyens nouveaux adaptés aux besoins spécifiques de cette tenhnique nouvelle. Les essais peuvent être classés en quatre catégories :

Les essais de maquettes diverses, exécutés dans des laboratoires spécialisés. Ils ont pour but de justifier expérimentalement certaines solutions retenues au cours de l'étude de l'appareil.

Les essais élémentaires nécessaires à l'étude et à la réalisation des ensembles et sous-ensembles qui constituent l'aéroglisseur.

Les essais du prototype.

Les essais des appareils de série.

Pour ne pas allonger outre mesure ce chapitre, seuls les essais concernant les aéroglisseurs amphibies à jupes souples sont analysés. La plupart de ces essais est applicable à d'autres catégories d'aéroglisseurs. Les essais particuliers à une catégorie pourraient d'ailleurs être définis par analogie avec ceux décrits dans ce chapitre.

2. LES LOIS DE SIMILITUDE

Les aéroglisseurs qui se déplacent au voisinage de la surface de séparation air-eau et (ou) air-sol ont profité dans leur développement des résultats obtenus dans les domaines de l'aérodynamique, de l'hydrodynamique et de la mécanique des vols. L'utilisation très poussée des essais de maquettes en soufflerie et au bassin des carènes a permis, moyennant quelques précautions, de connaître avec précision un certain nombre de caractéristiques des appareils en « vraie grandeur ». Les ingénieurs chargés d'étudier des aéroglisseurs ont profité des mêmes facilités. Ils ont donc été amenés à préciser les conditions de similitude applicables aux aéroglisseurs.

Un certain nombre de similitudes conservent soit le nombre de Reynolds $\mathcal{R} = \frac{V.l}{\nu}$, soit le nombre de Mach $\frac{V}{a}$, soit le nombre de Froude $\frac{V}{\sqrt{g.c}}$ pour les essais partiels; pour des essais de maquettes en vol libre, il est nécessaire de réaliser des maquettes dynamiquement semblables.

Deux systèmes géométriquement semblables au temps 0 sont dynamiquement semblables si les trajectoires de toutes les particules homologues sont semblables. Il en résulte que deux particules homologues M et M' de volumes respectifs dv et dv', de masses respectives $dm = \rho dv$ et $dm' = \rho' dv'$ décrivent pendant des temps dt et $dt' = \tau dt$ des arcs ds et $ds' = \lambda ds$. On en déduit que : les vitesses $V = \frac{ds}{dt}$ et $V' = \frac{ds'}{dt'}$ sont dans le rapport $\frac{V'}{V} = \frac{\lambda}{\tau}$, leurs accélérations Γ et Γ' sont dans le rapport $\frac{\Gamma'}{\Gamma} = \frac{\lambda}{\tau^2}$ et les forces élémentaires df et df' dans le rapport $\frac{df'}{df} = \frac{\rho' dv' \Gamma'}{\rho dv \Gamma} = \frac{\rho'}{\rho} \lambda^3 \frac{\lambda}{\tau^2}$. Comme les essais de maquettes sont effectués sur la Terre, les accélérations des deux mouvements doivent être les mêmes : donc $\frac{\lambda}{\tau^2} = 1$ et $\frac{dt'}{dt} = \lambda^{1/2}$.

Les masses volumiques de l'eau et de l'air sont conservées, donc : $\frac{\rho'}{\rho} = 1$.

$$\frac{dm'}{ds'^3} \cdot \frac{ds^3}{dm} = 1 \Rightarrow \frac{dm'}{dm} = \lambda^3$$

Les unités fondamentales sont donc dans les rapports :

$$\frac{ds'}{ds} = \lambda \qquad \frac{dm'}{dm} = \lambda^3 \qquad \frac{dt'}{dt} = \lambda^{1/2}$$

Les facteurs de similitude des autres unités sont déduits à partir de leur équation aux dimensions (rappelons qu'une équation aux dimensions précise si une grandeur est homogène à une masse M, une longueur L, à un temps T ou à une combinaison de ces grandeurs fondamentales du système d'unités SI. Ainsi une vitesse linéaire, égale au quotient d'une longueur et d'un temps, a une équation aux dimensions qui s'écrit L/T ou LT^{-1}). Le tableau ci-après donne les facteurs de similitude des grandeurs usuelles.

Il faut d'ailleurs remarquer dans ce tableau que le nombre de Froude est un invariant dans cette similitude ; on donne à celle-ci le nom de similitude de Froude.

L'examen du tableau montre aussi que le facteur de similitude des pressions est λ donc aussi celui des surpressions, des pertes de charge, etc., alors que la pression ambiante, généralement la pression atmosphérique, est un invariant, à moins d'essayer les maquettes dans une enceinte à pression réduite, ce qui est exclu.

Il en résulte que les rapports de pressions dans lesquels intervient la pression atmosphérique ne seront pas conservés. Cette remarque est fondamentale pour interpréter correctement le comportement dynamique des maquettes.

Unités	Dimension	Facteur de similitude
Longueur	L	λ
Surface	L^2	λ^2
Volume	L^3	λ^3
Temps	T	$\lambda^{\frac{1}{2}}$
Fréquence	T^{-1}	$\lambda^{-\frac{1}{2}}$
Vitesse linéaire	LT^{-1}	$\lambda^{\frac{1}{2}}$
Accélération linéaire	LT^{-2}	1
Masse	M	λ^3
Masse volumique	ML^{-3}	1
Force	MLT^{-2}	λ^3
Pression, contrainte	$ML^{-1}T^{-2}$	λ
Énergie, travail, couple, quantité de chaleur	ML^2T^{-2}	λ^4
Puissance	ML^2T^{-3}	$\lambda^{\frac{7}{2}}$
Débit en volume	L^3T^{-1}	$\lambda^{\frac{5}{2}}$
Débit en masse	MT^{-1}	$\lambda^{\frac{5}{2}}$
Nombre de Froude	0	1
Angle	0	1
Vitesse angulaire	T^{-1}	$\lambda^{-\frac{1}{2}}$
Accélération angulaire	T^{-2}	λ^{-1}

La similitude de Froude ne conserve pas le nombre de Reynolds. L'influence de ce nombre est bien connue des aérodynamiciens et l'interprétation des résultats en soufflerie ne présente aucune difficulté majeure. Il est cependant indispensable de prendre quelques précautions pour déterminer correctement sur la maquette les caractéristiques de l'écoulement interne extrapolables à l'appareil en vraie grandeur. Il faut en particulier s'assurer que la courbe pression-débit du coussin de la maquette est, à l'échelle près, identique à celle de l'appareil définitif car les pertes de charge dans les écoulements internes et les rendements des systèmes d'alimentation sont rarement en similitude.

La similitude de Froude ne conserve pas le nombre de Mach. Mais la détermination des caractéristiques aérodynamiques externes d'aéroglisseurs futurs à très grande vitesse ($M = 0{,}7$) est toujours possible par des essais dans des souffleries convenablement choisies.

3. ESSAIS DE LABORATOIRE

Ils sont effectués, soit sur des maquettes, soit sur des éléments en vraie grandeur.

3.1. Essais de maquettes

3.1.1. Essais en soufflerie. — Les coefficients aérodynamiques qu'il faut connaître ont été précisés dans le paragraphe 1.3.2. Pour ces essais il est nécessaire de représenter le sol en soufflerie. Cela a déjà été réalisé pour l'étude aérodynamique des automobiles ou des trains.

En soufflerie la maquette est fixe et la vitesse relative par rapport à l'air est obtenue par l'écoulement de la veine d'air. Pour une simulation idéale, la vitesse relative par rapport au sol doit être réalisée en communiquant au sol une vitesse égale et opposée. Cela est possible en utilisant un tapis roulant mais les difficultés de réalisation et les faibles écarts constatés entre les essais avec tapis roulant et ceux avec plancher fixe ont conduit à exécuter ces essais uniquement au-dessus d'un plancher. Le montage permet de faire varier l'angle de dérapage de 0 à 180°.

Le choix de l'échelle de la maquette doit tenir compte de cette nécessité pour éviter une obstruction trop importante de la veine quand l'angle de dérapage atteint 90°. En général, l'échelle d'une maquette d'aéroglisseur est donc plus petite que celle d'une maquette d'avion. Pour que le nombre de Reynolds de ces maquettes soit supérieur au nombre Reynolds critique, il est nécessaire, quand c'est possible, de choisir une vitesse de la veine suffisamment grande sinon des précautions doivent être prises pour transposer à l'appareil les résultats obtenus sur maquette (le nombre de Reynolds critique $\mathcal{R}_c$ correspond à un changement important de l'écoulement de l'air autour de la maquette ; pour $\mathcal{R}_e < \mathcal{R}_c$ des décollements laminaires peuvent exister qui recollent quand $\mathcal{R}_e > \mathcal{R}_c$. Cela modifie la valeur des coefficients aérodynamiques et $\mathcal{R}$ doit être supérieur à 10^6 ou 10^7 pour que les essais soient corrects).

Pour déterminer les différents coefficients aérodynamiques il est nécessaire d'essayer une maquette où sont représentés en fonctionnement, à l'échelle, les dispositifs de sustentation et de propulsion. Si cette précaution n'était pas prise, les interactions dues à la grande quantité d'air brassée par l'aéroglisseur pour se propulser et se sustenter fausseraient les résultats. Mais la réalisation d'une telle maquette et ses essais coûtent très cher surtout s'il est nécessaire de modifier la maquette en cours d'essai. Aussi est-il presque toujours prévu d'essayer auparavant une maquette plus rustique, facile à modifier. Sur cette maquette la sustentation n'est jamais simulée et la propulsion très rarement.

3.1.2. Essais au bassin des carènes. — Ce sont surtout des essais systématiques qui sont effectués au bassin des carènes et les maquettes utilisées ne sont, en général, pas semblables à un appareil déterminé. Compte tenu des facilités offertes par le bassin des carènes (vitesses et dérives constantes, vagues répétitives, balance pour la mesure des forces, etc.), ces essais permettent de confronter les résultats des calculs théoriques avec les résultats expérimentaux, en faisant varier les paramètres fondamentaux de la théorie.

3.2. Essais de maquettes volantes dynamiquement semblables. — À partir des résultats des essais en soufflerie et au bassin des carènes, les forces aéro-hydrodynamiques indispensables au calcul des performances de l'appareil en « vraie grandeur » sont connues avec une certaine précision. Mais le calcul théorique du comportement en vol, pour différents états de mer, n'est pas encore suffisamment bien programmé pour achever la définition de l'appareil sans avoir effectué un certain nombre d'essais avec une maquette dynamiquement semblable. Ces essais sont d'autant plus nécessaires que l'appareil est grand et que les modifications à apporter au cours des essais du prototype risquent d'être importantes. La technique actuelle des maquettes volantes libres, dynamiquement semblables, est au point et a fait ses preuves. Une maquette motorisée dynamiquement semblable doit avoir, aux lois de similitude près, la même répartition des masses et des rigidités, la même poussée, la même alimentation du coussin, le même coussin, les mêmes organes de pilotage, etc.

4. ESSAIS ÉLÉMENTAIRES

Pour faciliter l'exposé, les essais élémentaires correspondant aux différents sous-ensembles d'un aéroglisseur seront examinés successivement. Un aéroglisseur évolue au-dessus et à proximité d'une surface eau ou terre, dans un air chargé de particules fluides ou solides entraînées par l'air qui s'échappe du bas du coussin. Cet environnement est très agressif par l'action érosive et corrosive de ces particules.

Dans les programmes d'essais partiels il faut toujours avoir présente à l'esprit la nécessité de justifier la tenue des éléments essayés à l'érosion et à la corrosion auxquelles ils sont soumis en vol.

4.1. Essais élémentaires du coussin

4.1.1. Matériaux des jupes. — Statiquement, les jupes qui délimitent les différentes enceintes d'un coussin ne sont soumises qu'à des contraintes relativement faibles dues aux différences de pressions (quelques milliers de pascals) qui existent entre elles. Mais en vol il n'en est pas ainsi. Sous l'influence des obstacles rencontrés (vagues, houle sur mer, souches, troncs d'arbre sur terre, etc.) la pression subit des variations et atteint des valeurs nettement supérieures. Simultanément les jupes souples se plissent, se tendent, vibrent ; les déformations et les accélérations résultantes créent des contraintes locales importantes, notamment au voisinage des liaisons jupe-structure. Le bas des jupes est souvent en contact brutal avec l'eau et le sol. Les forces de frottement qui en résultent peuvent être à l'origine d'une usure accélérée du bas de jupe et même de déchirures importantes. En plus le repliement des jupes sur elles-mêmes quand l'appareil repose sur le sol impose encore quelques contraintes supplémentaires pour le choix du matériau le mieux adapté à la réalisation des jupes souples. Compte-tenu des efforts multiples subis par les jupes et de l'importance des prix d'achat et de maintenance dans le bilan d'exploitation d'une ligne d'aéroglisseur, le matériau ne doit être choisi qu'après la mesure d'un certain nombre de caractéristiques permettant de prévoir la durée de vie des jupes et leur entretien.

Le matériau utilisé pour les jupes est constitué d'un tissu (nylon, polyester, etc.) qui assure la résistance de la jupe, recouvert sur chaque face d'une couche d'élastomère (néoprène par exemple) qui assure l'étanchéité et protège le tissu contre l'humidité saline et l'abrasion.

Les caractéristiques suivantes doivent être mesurées ou au moins appréciées correctement :

résistance à la traction et allongement ;
résistance à l'abrasion ;
résistance aux déchirures ;
résistance aux poinçonnements ;
résistance à la fatigue ;
résistance au délaminage ;
résistance au plissage ;
résistance aux agents chimiques (combustibles, lubrifiants, fluides hydrauliques, etc.) ;

vieillissement en atmosphère saline et pendant le stockage;
influence de la température;
influence du rayonnement ultraviolet.

4.1.2. Essais de fonctionnement du coussin. — Le coussin est la pièce maîtresse de l'aéroglisseur, c'est lui qui le soutient au-dessus du sol ou de l'eau et c'est lui qui, en réduisant les accélérations transmises à la structure, assure le confort des passagers. La sustentation qu'il assure nécessite une puissance installée de l'ordre du tiers de la puissance totale. Il est donc indispensable que le rendement de sustentation soit le plus élevé possible. Cela nécessite une étude détaillée de l'agencement des jupes et des pertes de charge. Les lois de similitude sont là pour faciliter cette étude. En effet, le calcul des pertes de charge de l'écoulement dans un coussin d'air est quelquefois difficile et pas toujours précis. Pour optimiser le coussin d'air il y a donc intérêt à essayer une partie ou la totalité du coussin d'air à échelle réduite.

Au cours de ces essais, de très nombreuses mesures de pressions sont effectuées pour analyser l'écoulement interne. Parmi elles, les mesures suivantes permettent de calculer les pertes de charge du coussin réel :

— pression totale p_t et pression dynamique p_d dans un plan de référence situé dans le puits ventilateur généralement derrière le redresseur;

— pression statique moyenne p_c dans le coussin.

La différence entre la pression totale p_t et la pression statique p_c donne la valeur de la perte de charge du coussin de la maquette. Le coefficient de perte de charge ζ par unité de pression dynamique de référence p_d est égal à :

$$\zeta = \frac{p_t - p_c}{p_d}$$

On admet que ce coefficient sera le même sur l'appareil en vraie grandeur. Il suffit donc de calculer la pression dynamique p_d de l'appareil en vraie grandeur au droit de la section de référence pour obtenir la perte de charge de l'appareil en vraie grandeur. Connaissant la pression moyenne du coussin on déduit la pression totale à la sortie du ventilateur. Cela fournit un point de fonctionnement de la caractéristique pression-débit du ventilateur.

4.2. Essais élémentaires du ventilateur. Caractéristique débit-pression. — Le fonctionnement du coussin (sa stabilité) le comportement de l'aéroglisseur (sa réponse à la houle et aux obstacles sur sol), dépendent de la caractéristique du ventilateur : courbe donnant la pression totale en fonction du débit. Parmi les spécifications que le constructeur d'aéroglisseur impose au fabricant de ventilateurs, se trouvent quelques couples de valeurs (p_c, Q) et l'allure générale de la courbe. Un premier couple donne la surpression à débit nul. Un second couple donne la surpression et le débit correspondant au point nominal de fonctionnement du coussin d'air, pour une bonne part responsables du niveau sonore qui peut être mesuré dans la cabine.

4.3. Essais élémentaires des hélices. — Ces essais, qui ont pour but de connaître la poussée en fonction de la vitesse d'avancement et le comportement de l'hélice, sont assez proches des essais élémentaires du ventilateur; ils doivent confirmer que les spécifications techniques imposées au fabricant par le constructeur de l'aéroglisseur sont effectivement satisfaites. En général, les hélices sont à pas variable. Le pas peut atteindre des valeurs négatives importantes créant une poussée en réserve suffisante pour freiner et arrêter l'aéroglisseur en vol.

Ces essais sont le plus souvent effectués dans une soufflerie dont les dimensions de la veine sont suffisantes pour avoir le minimum d'interactions. Au cours de ces essais on détermine :

— la poussée en fonction de la vitesse d'avancement pour une vitesse de rotation déterminée et constante;

— le rendement de l'hélice défini par :

$$\eta_H = \frac{F_H V_a}{\omega H}$$

et on mesure les contraintes dans le moyeu et dans les pales ainsi que les modes de vibration de l'hélice.

Comme dans le cas du ventilateur, les fréquences des arbres de transmission et de la fixation des supports du moyeu ne doivent pas être trop voisines de celles des modes propres de l'hélice sinon des phénomènes de fatigue diminueraient de façon anormale la durée de vie du système propulsif. De plus, il est absolument inadmissible qu'un des premiers modes propres de l'hélice ait une fréquence égale à la fréquence du régime de rotation de l'hélice ou à un multiple ou sous multiple de ce régime.

L'intérêt de ces essais est suffisamment évident pour qu'en aucun cas ils ne soient omis.

4.4. Essais élémentaires du groupe moteur. — Le moteur lui-même a été essayé par le constructeur qui en a profité pour effectuer les réglages nécessaires à son emploi sur un aéroglisseur. À l'heure actuelle, aucun moteur installé à bord d'un aéroglisseur n'a été étudié et construit pour cet emploi spécifique.

Les moteurs à essence, les diesels rapides et les turbomoteurs qui sont utilisés, sont des adaptations des moteurs existants conçus pour des emplois très différents. L'environnement marin très agressif dans lequel ils travaillent impose au constructeur de nombreuses modifications; en particulier, dans le domaine des matériaux, les problèmes de corrosion sont essentiels. Dans le cas des turbomoteurs qui sont le plus souvent utilisés sur les appareils de quelques tonnes, il est absolument indispensable d'éliminer toutes traces d'eau de mer dans l'air aspiré par le compresseur pour éviter une réduction extrêmement rapide des performances et une détérioration accentuée du turbomoteur. Pour minimiser ces inconvénients, malgré un filtrage très poussé, le constructeur est conduit à livrer un moteur « détaré » (puissance maximale continue réduite) à l'utilisateur.

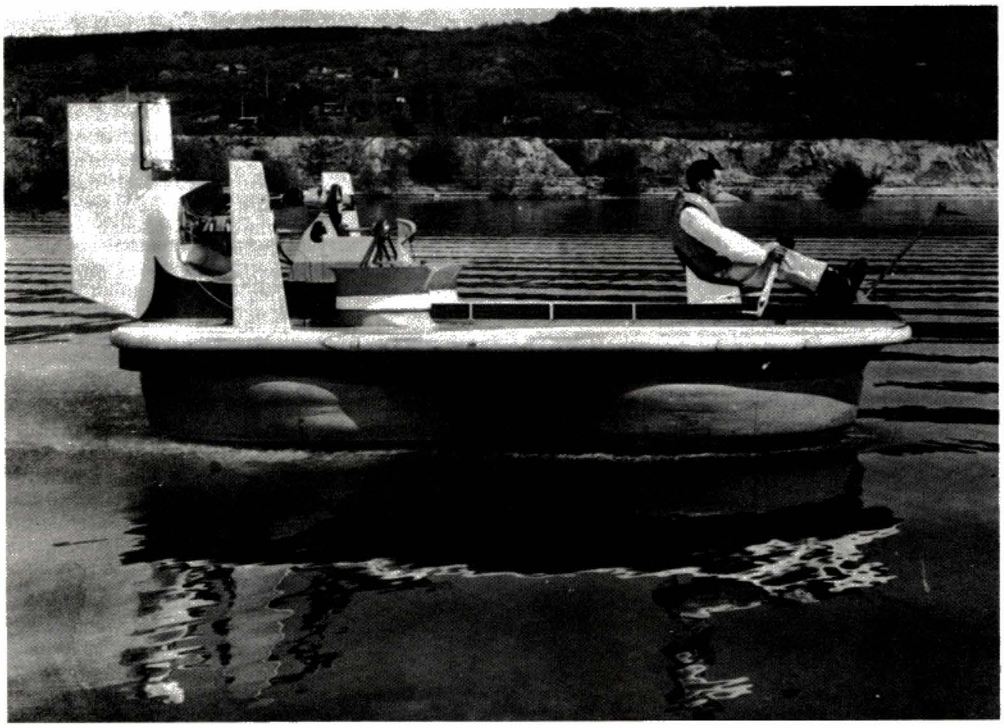
Dans le cas des turbomoteurs le filtrage doit assurer l'élimination non seulement des traces d'eau mais encore de toutes les poussières en suspension dans l'air quand l'aéroglisseur vole au-dessus du sol. L'installation des filtres doit être étudiée avec beaucoup de soins pour réduire les pertes de charge, assurer une vitesse de passage suffisante au droit des filtres et éviter de mettre la chambre d'aspiration des turbomoteurs en dépression. Dans certains cas, où l'agencement général de l'appareil pose des problèmes délicats pour le filtrage, il peut être nécessaire de réaliser une installation rudimentaire en vraie grandeur qui permette d'étudier dans tous ses détails le montage prévu.

La transmission de la puissance des moteurs aux hélices et aux ventilateurs nécessite le plus souvent une succession de réducteurs, de renvois d'angle et d'arbres de transmission. Il est très intéressant de prévoir un jeu supplémentaire des transmissions pour les essayer en endurance sur un banc d'essais reproduisant les différentes raideurs des points de fixation à la structure. Au cours de ces essais les contraintes sont mesurées et analysées, les modes de vibration sont identifiés et des décisions peuvent être prises pour le montage définitif des transmissions à bord de l'appareil.

4.5. Essais élémentaires de la structure. — La nécessité de construire léger pour rendre la charge marchande et, éventuellement, l'autonomie maximale, crée les mêmes impératifs aux fabricants d'aéroglisseurs et à ceux d'avions. Les essais élémentaires pour la mise au point des structures d'aéroglisseurs ne se distinguent pas, essentiellement, des essais élémentaires qu'effectuent les avionneurs.

Les problèmes de corrosion sont beaucoup plus importants sur les aéroglisseurs et s'apparentent davantage à ceux rencontrés à bord des navires. La protection, par peintures, des alliages légers qui sont sensibles à la corrosion présente quelques difficultés. La mise au point des gammes de peintures nécessite de nombreux essais d'éprouvettes qui sont soumises à un vieillissement artificiel accéléré.

L'utilisation des plastiques pour la réalisation des structures non travaillantes, qui peuvent être beaucoup plus nombreuses que sur un avion, pose aussi quelques problèmes particuliers que le constructeur d'aéroglisseur doit résoudre avec l'aide des fabricants de plastiques. L'insono-



Prototype d'essais du Naviplane N 101 (*S.E.D.A.M.*)

risation des cabines des pilotes et des passagers profite de l'expérience des avionneurs et des études qui ont été effectuées dans ce domaine ; elles prennent actuellement un très grand développement étant donné l'importance accordée à la réduction du bruit.

5. LES ESSAIS DU PROTOTYPE

Ces essais comportent obligatoirement deux phases :

— les essais en usine qui commencent à l'achèvement du montage de l'appareil et qui se terminent au premier point fixe sur l'aire de stationnement de l'usine de montage ;

— les essais d'évaluation qui ont pour but de vérifier que les performances imposées par les spécifications techniques sont réalisées, et de mettre au point le prototype en lui apportant les modifications imposées par les résultats des essais.

5.1. Essais de recette du prototype. — Avant cette phase d'essais, au fur et à mesure de leur achèvement, les éléments, sous-ensembles et ensembles subissent séparément les essais de recette chez les fournisseurs ou à l'usine de montage, conformément à des programmes élaborés en commun, à partir des spécifications techniques, par le constructeur de l'aéroglisseur et ses coopérants. Après l'assemblage final de l'appareil, les essais de recette du prototype peuvent commencer.

À partir de ce moment il y a d'ailleurs transfert de responsabilités du service-production au service-essai. Pour obtenir leur classification et le permis de naviguer, les aéroglisseurs doivent satisfaire à certaines réglementations. C'est le premier des buts de ces essais dits de recette, l'autre étant de s'assurer que l'appareil est en état de vol à la fin de ces essais.

5.2. Essais d'évaluation. — Avant de commencer les essais d'évaluation, il est nécessaire de connaître le poids et le centrage de l'appareil pour différents plans de charge. Une ou plusieurs pesées sont effectuées en se servant des points de levage prévus sous l'appareil.

Au cours du premier point fixe, on met en marche le ou les turbomoteurs avec la batterie de parc puis avec la batterie de bord. Éventuellement on met du pas aux hélices et aux ventilateurs en surveillant la charge thermique des moteurs. L'appareil est placé en assiette horizontale et l'on mesure sa hauteur de vol. On apprécie le comportement général de l'appareil et surtout des jupes. On exécute un essai d'endurance d'une heure pendant lequel les températures d'huile des moteurs et des différents sous-ensembles mécaniques sont mesurées.

5.2.1. Essais au point fixe sur sol. — Au cours de ces essais sont mesurées un certain nombre de caractéristiques de l'appareil en vol stationnaire et déterminées les références de vol qui permettront de définir avec précision les différentes configurations essayées en vol. On mesure les raideurs en pilonnement, en tangage et en roulis et la force propulsive. Au cours de ces essais, on vérifie en permanence le comportement des jupes.

5.2.2. Essais sur eau calme. — Ils ont pour but :

— d'évaluer les performances et les qualités de vol du prototype dans des configurations de vol normales et anormales ;

— de s'assurer du bon fonctionnement de tous les équipements de bord ;

— de vérifier que le niveau des contraintes en différents points de la structure est conforme aux prévisions et qu'aucun régime vibratoire, susceptible d'entraîner une fatigue anormale de la structure et des équipements ne se manifeste dans toutes les phases de vol. C'est au début de cette phase qu'intervient le premier essai qualitatif de déjaugeage à la charge maximale et les premiers vols de prise en main sans et avec le pilote automatique en fonctionnement. Au cours des essais sur eau calme, il s'agit de vérifier pour plusieurs configurations :

— la puissance nécessaire au déjaugeage,

— la manœuvrabilité avec et sans pilote automatique,

— la vitesse maximale,

— les vitesses limites correspondant aux différents centrages longitudinaux et la cause des limitations,

— les accélérations, les distances d'arrêt et les rayons de giration avec les différentes procédures prévues,

— la consommation horaire à différentes vitesses et l'autonomie correspondante.

5.2.3. Essais sur eau agitée. — On reprend tous les essais précédents pour déterminer les performances en fonction de l'état de la mer et de la force du vent pour différentes orientations de la trajectoire du prototype par rapport à la vitesse de la houle et à la vitesse du vent.

Dans chaque cas on précise la cause des limitations observées.

On mesure les paramètres liés au confort des passagers et on précise les configurations assurant le confort optimal.

L'exploitation des résultats de ces essais doit permettre de préciser le domaine de vol, les conditions limites de vent et de houle ainsi que les procédures de pilotage à utiliser dans les différentes phases de vol.

5.2.4. Essais de sécurité. — Les essais d'amerrissage, de flottaison, de mouillage, d'évacuation, de remorquage avec et sans sustentation, d'arrêt d'urgence, ont pour but de définir les procédures ne mettant pas en danger la sécurité des passagers et en particulier de préciser la vitesse de remorquage optimale en fonction du vent et de l'état de la mer.

6. LES ESSAIS DES APPAREILS DE SÉRIE

Les essais de réception des éléments, sous-ensembles et ensembles et les essais de recette des appareils de série sont pratiquement identiques à ceux du prototype. L'expérience acquise au cours de la première série d'essais, les modifications et améliorations apportées aux équipements et aux appareils permettent de réduire considérablement le temps consacré à ces essais sur les aéroglisseurs de série. Les essais d'évaluation sont aussi beaucoup moins longs. Leur but est de s'assurer que les appareils de série ont, dans le même domaine de vol, les mêmes performances que le prototype. En particulier, toutes les caractéristiques opérationnelles précisées dans le manuel de conduite doivent être vérifiées.

CHAPITRE V

UTILISATION ET EXPLOITATION

En France, les aéroglisseurs marins sont sous la tutelle de la Marine Marchande (Ministère des transports) qui les traite, en général, comme des bateaux tout en leur appliquant une réglementation particulière qui tient compte des recommandations de l'Organisation maritime consultative intergouvernementale (O.M.C.I.). Il existe actuellement une Réglementation provisoire des aéroglisseurs marins (R.P.A.M.) à laquelle doivent se conformer les constructeurs d'appareils prévus pour des voyages de première, deuxième et troisième catégories et transportant plus de douze passagers.

Un aéroglisseur marin doit satisfaire au R.P.A.M. et le constructeur confie à une société de classification agréée par la Marine marchande (bureau Veritas, par exemple) la surveillance de ses études, de sa fabrication et de sa réception. Compte tenu du caractère de nouveauté des aéroglisseurs marins le bureau Veritas a publié une note d'information dont le but est de fournir des bases de discussions entre les constructeurs, les utilisateurs et les services chargés du contrôle, pour les problèmes concernant leur classification.

Les aéroglisseurs neufs ayant satisfait aux conditions énoncées dans cette note d'information qui complète le R.P.A.M., tant en ce qui concerne la vérification des plans et notes de calculs que le respect des prescriptions touchant la construction et les essais, sont classés au registre du bureau Veritas avec la cote 1-3/3 suivi de la marque V.C.A. (véhicule sur coussin d'air).

1. MAINTIEN DE LA COTE

Le maintien de la cote nécessite que l'accès aux véhicules classés soit, en tout temps, libre pour les experts de la société de classification afin de leur permettre la vérification du bon état de ces appareils. Ils peuvent, à tout moment, consulter les documents officiels, afin de juger si l'appareil n'a pas été utilisé dans des conditions plus défavorables que celles autorisées et s'assurer que les travaux d'entretien et les révisions ont été exécutés.

1.1. Visites spéciales. — Pour être maintenu dans sa cote, un aéroglisseur doit être soumis tous les deux ans à une visite spéciale. Au cours de cette visite l'expert s'assure du bon état de la structure, des installations de propulsion et de sustentation et du bon fonctionnement des dispositifs de sécurité.

1.2. Visites ordinaires. — Ces visites de moindre étendue que les visites spéciales doivent avoir lieu à des intervalles ne dépassant pas un an ou mille heures de fonctionnement. Elles comprennent un examen extérieur de la coque, une vérification des attaches des jupes et des organes de transmission de la motorisation.

1.3. Visites occasionnelles. — Elles ont lieu à l'occasion, soit de réparations d'avaries, soit de modifications apportées à la structure ou à la motorisation.

2. TITRES DE SÉCURITÉ

Tout aéroglisseur marin français doit être muni d'un permis de navigation et d'un certificat de sécurité délivrés par les Affaires maritimes du lieu d'inscription de l'appareil considéré. Ces titres sont valables pendant une période d'une année et sont renouvelables.

Les titres de sécurité provisoires sont délivrés aux aéroglisseurs, nouvellement construits en France qui doivent quitter leur lieu de construction pour achever leur aménagement ou prendre armement dans un autre port. Il en est de même pour les navires construits ou acquis à l'étranger et expédiés pour un premier voyage sous le régime de la francisation provisoire.

Les titres de sécurité peuvent être retirés avant l'expiration de leur durée de validité si l'aéroglisseur cesse de satisfaire aux conditions prévues pour leur délivrance (graves avaries, changements importants dans la structure et les aménagements).

La délivrance des titres de sécurité est subordonnée à :

— l'approbation par la Commission centrale de sécurité (C.C.S.) d'un ensemble de plans et de documents qui doivent être conformes aux règles du R.P.A.M. ;

— des essais en mer effectués en présence de représentants de l'Administration pour vérifier que l'aéroglisseur est bien apte aux conditions de navigation pour lesquelles le permis de navigation est demandé ;

— des visites de représentants de l'administration pour vérifier que l'appareil répond aux exigences du R.P.A.M.

3. DOCUMENTS DE BORD

Tout aéroglisseur marin en service doit avoir obligatoirement à son bord les documents suivants qui sont soumis à l'approbation de l'administration.

3.1. Manuel de conduite. — Il donne :

— les caractéristiques opérationnelles permettant au pilote d'exploiter son véhicule dans les meilleures conditions de sécurité (charge maximale, tolérances de centrage, vitesses, hauteurs de vol, consommations horaires, distances d'arrêt, caractéristiques de giration, etc.) ainsi que les conditions limites de vent et de houle ;

— les informations sur la conduite du véhicule et notamment une description des dispositifs de commande et de contrôle de l'appareil et des indications sur la façon de les utiliser, des tableaux donnant les limites d'utilisation des moteurs et des organes de propulsion et de sustentation, des renseignements sur les installations de secours et de sauvetage ;

— la liste et les modalités d'exécutions des visites périodiques nécessaires au contrôle du bon fonctionnement de l'appareil.

3.2. Journal de bord. — Il se subdivise en deux documents :

Le premier est un compte rendu d'exploitation établi par jour ou par voyage. Il est rédigé et signé par le capitaine. Il doit préciser :

le nom du capitaine,
le numéro d'immatriculation de l'aéroglisseur,
le nom des membres de l'équipage,
les heures d'atterrissage et de décollage,
les observations d'ordre technique et commercial.

Le deuxième est un compte rendu matériel qui est aussi établi par jour ou par voyage.

Il mentionne :

les temps de fonctionnement des moteurs et de la cellule,
le type et la date de la dernière visite effectuée,
les observations de l'équipage sur le fonctionnement des équipements,
les observations des services techniques à terre sur les travaux exécutés en escale,
les pleins, etc.

Il est signé par le capitaine et contresigné par le responsable des services techniques à terre.

Cet article a été rédigé par Messieurs Guy Delamare, Marcel Gout, André Grihangne et Dominique Pont.

Certains développements s'inspirent des études faites ces dernières années, notamment par Messieurs :

P.R. Crewe, R.L. Wheeler, A. Silverleaf, I. Cross, G.A. O'Flaherty, J.T. Everest, R.C. Willis, N. Hogben, M.J. Barrat, J.N. Newman, F.A.P. Poole, R. Hirsch, M. Faure.

Il existe également des réalisations expérimentales d'**AÉROGLISSEURS GUIDÉS SUR RAIL.** L'état de ces travaux ne nous permet pas actuellement de présenter un article.

TABLE DES MATIÈRES

TOME IV

LE RAIL

LA ROUTE

GÉNÉRALITÉS

LE MOTEUR

LA TRANSMISSION

L'ÉQUIPEMENT

LES ESSAIS DE LA VOITURE AUTOMOBILE

Pages

LES VÉHICULES AUTOMOBILES SPÉCIAUX

LA CONDUITE ET L'ENTRETIEN DES VÉHICULES AUTOMOBILES

LES MOTOCYCLES

AÉRONAUTIQUE

LE MILIEU

PRINCIPES

MATÉRIELS AÉROSPATIAUX

MISE AU POINT ET ESSAIS

UTILISATION DES MATÉRIELS AÉRONAUTIQUES

UTILISATION DES VÉHICULES SPATIAUX

LES AÉROGLISSEURS

TABLE DES HORS-TEXTE

Ont participé à la réalisation des tomes Mécanique

(Généralités, Applications : GA — Applications, Transports : AT)

Robert MÉRAT, secrétaire général de la rédaction

ABRAHAM (Claude), ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, directeur adjoint des Transports aériens — Tome AT — Conditions de fonctionnement de l'aviation civile
L'aviation commerciale
L'aviation générale

AUDOIN (Jean), administrateur civil M.C., chargé de mission à la direction des Transports aériens (S.G.A.C.) — Tome AT — Conditions de fonctionnement de l'aviation civile
L'aviation commerciale
L'aviation générale

AUVIGNE (Jean), maquettiste, ancien professeur d'enseignement technique, journaliste de l'automobile et du véhicule industriel — Tome AT — Carrosserie

BEAUDOUX (Nicolas), ingénieur-conseil, ancien élève de l'École polytechnique, licencié en droit — Tome AT — Historique de l'automobile
Dynamique de l'automobile
La direction
La suspension

BISMUT (Marcel), ingénieur civil des Mines, lauréat de l'Académie des Sciences, directeur adjoint à l'Office national d'Études et de Recherches aérospatiales — Tome AT — Mécanique du vol : § 3 et 5

BOILEAU (Robert), ingénieur A.M. et E.S.E., ingénieur en chef H.C., chef du département Constructions (Traction électrique) de la S.N.C.F. — Tome AT — Traction électrique

BOUTONNET (Jean), ingénieur principal honoraire de la S.N.C.F. — Tome AT — L'attelage automatique

BROQUET (Claude), chef de travaux de métallurgie au Conservatoire national des Arts et Métiers, ingénieur C.N.A.M., docteur-ingénieur — Tome GA — Métaux et alliages

BRUN (Raymond), ingénieur E.C.P. et E.N.S.P.M., chef des études de locomotives et moteurs thermiques de la S.N.C.F., professeur à l'École centrale des Arts et Manufactures, professeur à l'École nationale supérieure du Pétrole et des Moteurs, professeur au Centre d'études supérieures de l'Industrie automobile, président-fondateur du Groupe européen d'Études de la filtration et de la Société française de filtration, vice-président de la Société des ingénieurs de l'Automobile et de la Société d'encouragement pour l'Industrie nationale — Tome AT — La traction à moteur thermique

BRUNER (Georges), ingénieur-conseil diplômé de l'École polytechnique de Varsovie, collaborateur du service de documentation du ministère de l'Air — Tome AT — L'avion : § 2 à 5
Aménagement des avions civils et militaires
Les propulseurs

BRUNETAUD (Robert), ingénieur en chef au laboratoire de la direction technique de la S.N.E.C.M.A. — Tome AT — Matériaux utilisés en aéronautique

CÉRÉSUELA (René), licencié ès sciences, ingénieur à l'Office national d'Études et Recherches aérospatiales	Tome AT — Aérodynamique des avions et des missiles : § 4 à 6
CHATAIN (Michel), ingénieur Institut industriel du Nord (I.D.N.), docteur de l'Université de Paris, directeur du Centre d'étude des matières plastiques, professeur à l'E.N.S.A.M.	Tome GA — Plastiques
CHAUVELIN (Gérard), ingénieur Méthodes	Tome GA — Découpage des métaux : § 1 Emboutissage
DELAMARE (Guy), directeur recherche-développement de la société Superflexit	Tome AT — Aéroglisseurs non guidés
DORIOT (Jean), ingénieur breveté des Écoles Nationales des Arts et Métiers, ingénieur principal honoraire à la Société Nationale des Chemins de fer Français (S.N.C.F.)	Tome AT — Matériels pour le transport des marchandises
DUCHANGE (André), ingénieur en chef	Tome AT — Embrayage Boîte de vitesses Transmission Roues
DUVAL (Robert), ingénieur E.E.M.I. à la Société des carburateurs Solex	Tome AT — L'alimentation du moteur
DRIVIÈRE (Jacques), ingénieur C.N.A.M., professeur à l'École nationale supérieure des Arts et Métiers de Paris	Tome GA — Mécanique des fluides
FERRÉOL (Henri), professeur technique licencié	Tome AT — Le radar
FLOUCAUD-PÉNARDILLE (Jean), colonel breveté technique E.R., ingénieur diplômé de l'École polytechnique, ingénieur-conseil	Tome AT — Pneumatiques Motocycles Conduite et entretien des véhicules automobiles
FOURNAS DE LA BROSSE (Max de), ingénieur au laboratoire de machinisme agricole de l'Institut national agronomique	Tome AT — Tracteur et machines agricoles
† GARNIER (Jacques), président de la commission Machinisme agricole, véhicules routiers et spéciaux à la S.I.A., membre de la commission technique de l'Automobile-Club de France, chargé de cours à l'I.N.A. de Grignon	Tome AT — Véhicules industriels
GENIER (Gaston-René), rapporteur général au Syndicat national de la Chaudronnerie, de la Tôlerie et de la Tuyauterie industrielle	Tome GA — Chaudronnerie
GERBEAUX (Henri), ingénieur des Arts et Métiers, ingénieur attaché à la direction de l'Institut de Soudure	Tome GA — Découpage des métaux : § 2 Soudage
GIRONNET (Bernard), ancien élève de l'E.N.S.E.T., professeur à l'École nationale supérieure d'Arts et Métiers de Paris	Tome GA — Étude des constructions : chapitre 6
GOUT (Marcel), licencié ès sciences, ingénieur en chef à la S.E.R.E.B., directeur essais et recherches à la S.E.D.A.M., adjoint au directeur, conseiller scientifique et technique à la R.A.T.P.	Tome AT — Aéroglisseurs non guidés
GRIHANGNE (André), capitaine de vaisseau, ingénieur des Arts et Métiers, ingénieur de Marine, ingénieur civil de l'Aéronautique, ex-directeur technique et industriel de la S.E.D.A.M., chargé des études à long terme pour les navires non conventionnels par la Marine Nationale	Tome AT — Aéroglisseurs non guidés
GUBLIN (Fernand), diplômé de l'E.N.S.E.T., professeur à l'École nationale supérieure des Arts et Métiers de Paris	
GUILLAMON (Jean), ingénieur des Arts et Métiers, professeur honoraire des 4ᵉ année de l'École nationale supérieure d'Arts et Métiers de Paris, ingénieur-conseil	Tome GA — Fonderie Métallurgie des poudres
GUILLOT (Robert), ingénieur E.C.L.	Tome GA — Filage par choc
HAMANN (Jacques), ingénieur C.N.A.M., médaillé de l'Aéronautique	Tome AT — Hélicoptères — VTOL et STOL
HUET de la TOUR (Raoul), ingénieur E.C.P.	Tome AT — Matériaux utilisés en aéronautique
KERVERSAU (Emmanuel de), ingénieur civil des Mines, directeur du Centre technique de la Grosse forge française	Tome GA — Forgeage au marteau

KUHN (Rolf), ingénieur des Arts et Métiers et de l'École nationale supérieure des Pétroles et des Moteurs	Tome AT — Injection
LACHNITT (Jacques), ingénieur civil de l'Aéronautique, professeur à l'Institut supérieur d'électronique de Paris et à l'E.T.A.C.A.	Tome AT — Propulsion : § 1 à 4 Lanceurs et fusées-sondes Essais au sol : § 2 Véhicules spatiaux
LACOMBE (Christian)	Tome AT — Motocycles
LAPLAICHE (Maurice), ingénieur général, chef du département des Essais service du matériel de la S.N.C.F.	Tome AT — Freinage des trains Automatisation de la marche des trains
LAURENT (Charles), ancien élève de l'École polytechnique	Tome AT — Télécommunications au chemin de fer
LE BRAS (Jean), docteur-ingénieur E.S.P.C.I., conseiller scientifique de l'Institut français du caoutchouc, de la Revue générale des caoutchoucs et plastiques et de l'Ecole d'enseignement technique de l'I.F.C.	Tome GA — Caoutchoucs
LECLERCQ (Roger), directeur technique de la division Aéronautique chez Jaeger	Tome AT — Instruments de bord des avions
LEGUEN (Henri), licencié ès sciences, ingénieur de l'École nationale supérieure des Pétroles et des Moteurs	Tome AT — Les essais de la voiture automobile
LÉVY (Claude), ingénieur des Arts et Manufactures, ingénieur général honoraire de la R.A.T.P.	Tome AT — Les chemins de fer urbains
LEYNAERT (Jacky), ingénieur civil de l'Aéronautique à l'Office national d'Études et de Recherches aérospatiales	Tome AT — Propulsion : § 5
LIBERMANN (Georges), ingénieur des Arts et Métiers, professeur de l'enseignement technique	Tome GA — Dessin technique
LOURADOUR (Guy), ancien élève de l'E.N.S.E.T., professeur à l'École nationale supérieure d'Arts et Métiers de Paris	Tome GA — Étude des constructions : chapitre 6
MAILLARD (Michel), ingénieur divisionnaire des Travaux publics de l'État	Tome AT — Conditions de fonctionnement de l'aviation civile L'aviation commerciale L'aviation générale
MARTINET (Charles), ingénieur des Arts et Métiers	Tome GA — Estampage
MONNERIE (Bernard), ingénieur de l'Armement	Tome AT — Aérodynamique des avions et des missiles : § 7
NOURY (Jacques), président-directeur général de la Société J. Noury et Fils, délégué consulaire de la Chambre de Commerce et d'Industrie de Paris	Tome GA — Repoussage
ODIER (Jean), ingénieur civil des Mines, lauréat de l'Académie des Sciences, directeur des Études avancées à la Société anonyme française du Ferodo	Tome AT — Les freins de l'automobile
OUTURQUIN (Robert), ancien ingénieur de l'O.N.E.R.A.	Tome AT — Propulsion : § 6 Mécanique du vol : § 4 Essais au sol : § 3 Le vol spatial circumterrestre et planétaire
PAULMIER (Claude), ingénieur C.N.A.M., directeur adjoint des Études à la Société Solex	Tome AT — Historique et principe des moteurs thermiques - Thermodynamique et aérodynamique du moteur à combustion - Étude dynamique du moteur - Étude technologique - Graissage - Refroidissement - Suralimentation - Insonorisation - Dépollution
PELLEVAT (André), ingénieur des Arts et Manufactures, ingénieur principal, hors-classe, honoraire de la S.N.C.F., ancien ingénieur en chef de la Compagnie des Ateliers et Forges de la Loire	Tome AT — Traction à vapeur
PERRIN DE BRICHAMBAUT (Christian), ingénieur en chef de la Météorologie, ancien élève de l'École polytechnique	Tome AT — Le milieu
PLANEIX (Michel), ingénieur I.D.N., professeur technique	Tome GA — Résistance des matériaux Étude des constructions : chapitres 1 à 5 Chaudronnerie
PONS (Serge), professeur de Métrologie au Lycée technique Raspail à Paris	Tome GA — Métrologie

PONT (Dominique), ingénieur civil du Génie maritime	Tome AT — Aéroglisseurs
PROVOST (Jean-Loup), ingénieur en chef de l'Aviation civile	Tome AT — Conditions de fonctionnement de l'aviation civile L'aviation commerciale L'aviation générale
PRUD'HOMME (André), ancien élève de l'École polytechnique, ingénieur général à la S.N.C.F. (direction de l'Équipement)	Tome AT — La voie ferrée L'adhérence roue-rail
REBUFFET (Pierre), licencié ès sciences, ingénieur E.S.E., collaborateur extérieur de l'Office national d'Études et de Recherches aérospatiales (O.N.E.R.A.), professeur à l'École nationale de l'Aéronautique et de l'Espace (E.N.S.A.E.)	Tome AT — Aérodynamique des avions et des missiles : § 1 à 4
RENAUDIE (Jean), ingénieur civil de l'Aéronautique, ingénieur navigant d'essais en vol au Centre d'Essais en vol de Brétigny	Tome AT — L'avion : § 1 Essais en vol
ROUGIER (Pierre), ingénieur E.C.L., docteur-ingénieur	Tome AT — Hélicoptères — VTOL et STOL
SALENSON (Henri), ingénieur-conseil à la Société S.E.V.-Marchal (groupe Ferodo)	Tome AT — Installation électrique de l'automobile
† SALMON (Pierre), ancien élève de l'École polytechnique, licencié ès sciences physiques, docteur en droit, ingénieur général de l'Armement, administrateur du Conservatoire national des Arts et Métiers	Tome GA Usinage
THOMAS D'ANNEBAULT (Georges A.), journaliste aérospatial, ancien fonctionnaire international	Tome AT — Essais au sol : § 1 La recherche scientifique Autres applications
TRAVERS (Louis), chef d'Études principal à la direction du Matériel de la S.N.C.F.	Tome AT — Matériels pour le transport des voyageurs
VILLEMOT (Dominique), ingénieur E.N.S.C.S., licencié ès sciences	Tome GA — Collage
VIVIER (Lucien), ingénieur des Arts et Métiers, professeur à l'École nationale supérieure des Arts et Métiers de Paris	Tome GA — Étude des constructions : chapitres 7 et 8
WANNER (Jean-Claude), ingénieur en chef de l'Armement, directeur technique de l'Office national d'Études et de Recherches Aérospatiales, ingénieur navigant d'essai et de réception, pilote militaire, professeur de mécanique du vol (École nationale supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, École centrale des Arts et Manufactures de Paris), et de propulsion des avions (École nationale de l'Aviation Civile)	Tome AT — Mécanique du vol : § 1 et 2
WEBER (Olivier), ancien élève de l'École polytechnique, chef du département des Installations électriques, de signalisation, de télécommunications et de caténaires de la S.N.C.F.	Tome AT — Installations de sécurité au chemin de fer

CORRECTEURS

AMAT (Émile). BONVALLOT (Jean-Luc). BRON (Jean-François). FLOUCAUD-PÉNARDILLE (Jean). ISSELIN (Sergine). JUNOD (Andrée). OUTURQUIN (Robert). PLANEIX (Michel). TÉBEC (Jean-Louis).

DESSINATEURS

BENTEGEAT (Jean). BONGIORNO (Marc). BOULIFARD (Guy). CALACI (Claude). FORLER (Gérard). Société I.C.D.F. TARDIEU (Didier).

IMPRIMÉ ET RELIÉ

POUR LA

LIBRAIRIE ARISTIDE QUILLET

PAR

L'IMPRIMERIE ALSACIENNE JEAN DIDIER

DÉPÔT LÉGAL : JUILLET 1983

N° D'ORDRE ÉDITEUR 183 — N° D'IMPRESSION 83111